

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

**LUCAS DO VALE PEREIRA LIVRAMENTO**

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE  
DISCOS DE FREIO DE VEÍCULOS DE PASSEIO**

Joinville

2017

**LUCAS DO VALE PEREIRA LIVRAMENTO**

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE  
DISCOS DE FREIO DE VEÍCULOS DE PASSEIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção de título de bacharel em Engenharia Automotiva no curso de Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonio Fiorentin.

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Mikowski.

Joinville

2017

ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE DISCOS  
DE FREIO DE VEÍCULOS DE PASSEIO

LUCAS DO VALE PEREIRA LIVRAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para obtenção do título  
de bacharel em Engenharia Automotiva da  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro  
Tecnológico de Joinville.

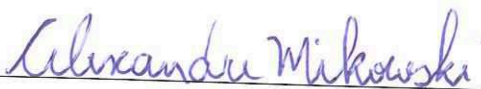
Joinville (SC), 24 de Novembro de 2017.

Banca Examinadora:



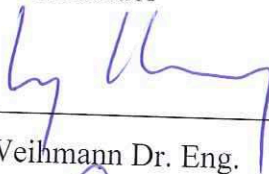
Thiago Antonio Fiorentim Dr. Eng.

Orientador/Presidente



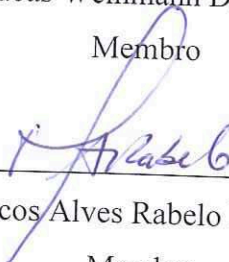
Alexandre Mikowski Dr. Físico.

Coorientador



Lucas Weihmann Dr. Eng.

Membro



Marcos Alves Rabelo Dr. Eng.

Membro

Agradeço ao meu professor orientador, Dr. Thiago Antonio Fiorentin por seu apoio, pelo empenho na busca dos equipamentos e materiais necessários para a pesquisa, pelo conhecimento transmitido e atenção entregue na execução deste trabalho.

Agradeço ao meu professor coorientador, Dr. Alexandre Mikowski, pela paciência, incentivo, melhora deste trabalho, dedicação e tempo, os quais tornaram este trabalho possível.

Agradeço a minha família, minha namorada e meus amigos que sempre me apoiaram e incentivaram nas escolhas durante a jornada deste curso.

Agradeço ao colega Éder dos Reis Silva da empresa Tupy, por seu apoio, troca de informações e preparação dos corpos de prova para execução dos ensaios laboratoriais.

Agradeço aos laboratórios de, Modelagem e análise de dados (LabMAD), Vibrações e Acústica, Veicular do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), por ceder o espaço e infraestrutura de suporte para o desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço ao professor Breno Salgado Barra por ceder o uso da balança do laboratório de solos do CTJ.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade, pelo suporte e por fornecer auxílio durante minha formação de Engenheiro Automotivo.

## **RESUMO**

Neste trabalho serão abordados dados de composição de discos de freio automotivos e suas características operacionais. São apresentados os tipos de sistemas de freio e características físicas dos discos mais utilizados nos veículos de passeio e alguns materiais utilizados para sua confecção. Também são abordados conceitos físicos envolvidos no mecanismo da frenagem. O trabalho foi direcionado para a análise e comparação das propriedades de discos de freio entre modelos novos de diversos fabricantes e também com um modelo com 80 mil quilômetros de uso, sendo estes utilizados no mesmo modelo de veículo. Busca entender quais as diferenças entre unidades disponíveis no mercado de reposição e o porquê da diferença de valores. Os dados para o estudo são mensurados através de testes mecânicos realizados em laboratório, nos corpos de prova obtidos de cada disco de freio. Os ensaios visaram simular condições que possam ocorrer durante uma situação de frenagem. Foram efetuadas medições geométricas e executados testes de dureza, tração, composição química e metalografia. Ainda, é apresentada uma sequência de operações que foram tomadas em cada procedimento experimental para obtenção dos resultados. Por fim, a comparação entre as amostras indica que há pouca diferença de matéria prima, porém o tratamento a qual é submetida cada amostra durante a fabricação leva a diferença nas propriedades mecânicas de cada uma.

**Palavras-chave:** Discos de freio. Composição química. Propriedades mecânicas.

## **ABSTRACT**

In this work, it will be presented data from brake discs composition of light vehicles and their operational features, brake systems types, some materials and physical attributes of the discs usually present in small vehicles. Also, it will be presented the mainly physical concepts involved in the mechanism of braking are commented. The main goal in this work is to compare and analyze the properties from brake discs between new models of different manufactures and one used model with 80 thousand kilometers which were applied in the same vehicle. Trying to understand the differences between the available units in the aftermarket and why they are offered with different prices. The data for this study was measured subjecting the samples through a few mechanical assays, such as geometrics measurements, hardness, traction, chemical composition and metallography. The tests aimed the simulation of conditions close to the founded in real braking events. Yet, it is showed the used sequence of operations for each experimental procedure to achieve the results. Finally, the comparison between the samples, indicates that there are few differences in the raw material, otherwise the treatment in the manufacturing process, in which the material is subject to, induces disparities in the mechanical properties of each disc.

**Keywords:** Brake discs. Chemical composition. Mechanical properties.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação de energia de um corpo.....	18
Figura 2 - Classificação de freios. ....	19
Figura 3 - Representação do freio a tambor. ....	21
Figura 4 – Ilustração das forças pressionando o disco. ....	22
Figura 5 - Representação do conjunto de roda do freio a disco. ....	22
Figura 6 - Tipo de freio a disco: (a) tipo fixo; (b) tipo flutuante.....	23
Figura 7 - Disco de freio sólido. ....	24
Figura 8 - Vista frontal de um Sistema de freio com disco ventilado. ....	25
Figura 9 - Ilustração de disco ventilado e perfurado juntamente com o caliper.....	26
Figura 10 - Disco de freio ranhurado.....	27
Figura 11 - Disco de freio usado com 80 mil quilômetros. ....	35
Figura 12 - Balança usada na medição. ....	37
Figura 13 - Disco com marcação da área a ser removida e disco com remoção do corpo de prova. ....	38
Figura 14 - Corpos de prova para análise de carbono e metalográfica.....	39
Figura 15 - Máquina medição do percentual de carbono por combustão.....	39
Figura 16 - Representação do ensaio de dureza Brinell. ....	41
Figura 17 - Posições de medições de dureza Brinell. ....	43
Figura 18 - Amostras sob teste de dureza Brinell.....	43
Figura 19 - Esquematização do ensaio de tração.....	44
Figura 20 - Demarcação da região a ser analisada. ....	45
Figura 21 - Disco de freio H.....	46
Figura 22 - Acondicionamento do disco H.....	47
Figura 23 - Comparação discos com e sem entalhe.....	48
Figura 24 - Acondicionamento do disco F. ....	48
Figura 25 - Disco de freio PO.....	49
Figura 26 - Ilustração do acondicionamento do disco PO.....	49
Figura 27 - Discos novos lado a lado. ....	50
Figura 28 - Valor de mercado dos objetos de estudo. ....	51
Figura 29 - Ilustração das regiões medidas. ....	52

Figura 30 - Ilustração das regiões medidas. ....	53
Figura 31 - Gráfico da espessura da pista. ....	54
Figura 32 - Largura pista. ....	55
Figura 33 – Resultado do ensaio de dureza Brinell. ....	62
Figura 34 – Resultado do ensaio de tração. ....	63



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da forma da grafita. ....	31
Tabela 2 - Classificação do tipo da grafita - forma I. ....	31
Tabela 3 - Classificação do tamanho da grafita - forma I . ....	32
Tabela 4 - Resultado das medições geométricas. ....	56
Tabela 5 – Resultados das medições geométricas. ....	57
Tabela 6 - Tabela de resultados da análise por combustão.....	58
Tabela 7 - Tabela de resultados por espectrometria de emissão óptica.....	58
Tabela 8 - Resultados das análises metalográficas dos discos de freio. ....	59
Tabela 9 - Resultados das análises metalográficas dos discos de freio. ....	60
Tabela 10 - Classificação das amostras. ....	61

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_e$	Altura entalhe	[mm]
$A_c$	Altura círculo central	[mm]
$A_r$	Altura do Rasgo	[mm]
$D_b$	Distância furo a borda	[mm]
$D_c$	Diâmetro furo cubo	[mm]
$D_e$	Diâmetro externo	[mm]
$D_g$	Diâmetro furo guia	[mm]
$D_p$	Diâmetro furo parafuso	[mm]
$D$	Diâmetro do penetrador	[mm]
$d$	Diâmetro da impressão	[mm]
$E_m$	Espessura mínima	[mm]
$E_p$	Espessura pista	[mm]
$E_c$	Espessura círculo central	[mm]
$E_t$	Espessura total	[mm]
HB	Dureza Brinell	[kgf/mm <sup>2</sup> ]
$L_p$	Largura pista	[mm]
$m$	Massa	[Kg]
$P$	Carga de impressão	[N]
$P_p$	Profundidade panela	[mm]
$S$	Área da calota esférica impressa	[mm <sup>2</sup> ]
$V_m$	Valor de mercado	[R\$]

## LISTA DE ABREVIACES

ABNT	Associao Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computao Auxiliada por Computador
C <sub>p</sub>	Corpo de Prova
<i>CTJ</i>	Centro Tecnológico de Joinville
FC	Ferro Fundido Cinzento
FIPE	Fundao Instituto de Pesquisas Econmicas
LABMAD	Laboratório de Modelagem e Análise de Dados
LTDA	Sociedade Empresarial de Responsabilidade Limitada
<i>OES</i>	Espectrometria de Emissão ptica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS .....	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos .....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1	DEFINIÇÕES .....	17
2.1.1	Energia.....	17
2.1.2	Energia cinética.....	18
2.1.3	Calor.....	18
2.1.4	Atrito .....	18
2.2	SISTEMA DE FREIO .....	19
2.2.1	Freio a tambor.....	20
2.2.2	Freio a disco.....	22
2.3	DISCO DE FREIO .....	24
2.3.1	Disco Sólido .....	24
2.3.2	Disco Ventilado .....	25
2.3.3	Disco Perfurado .....	26
2.3.4	Disco Ranhurado .....	27
2.3.5	Pastilha de Freio .....	27
2.3.6	Modos de Falha .....	28
2.3.7	Material .....	29
2.4	ESTADO DA ARTE .....	32
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>34</b>
3.1	SELEÇÃO DOS DISCOS DE FREIO .....	34
3.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS DISCOS DE FREIO SÓLIDOS 36	
3.2.1	Medições de grandezas geométricas e massa .....	36
3.2.2	Caracterização química dos materiais dos discos.....	37
3.2.3	Caracterização metalográfica dos materiais dos discos .....	40
3.2.4	Caracterização mecânica dos materiais dos discos.....	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>46</b>
4.1	ANÁLISE DOS PRODUTOS ADQUIRIDOS .....	46
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS DISCOS DE FREIO SÓLIDOS.....	51
4.2.1	Análise geométrica e de massa dos discos de freio sólidos.....	52

4.2.2	Composição química.....	57
4.2.3	Metalografia .....	59
4.2.4	Dureza Brinell .....	61
4.2.5	Tração .....	62
5	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES .....	64
5.1	CONCLUSÕES .....	64
5.2	TRABALHOS FUTUROS .....	65
	REFERÊNCIAS .....	66

## 1 INTRODUÇÃO

É perceptível que o automóvel é item indispensável na vida cotidiana. Sua capacidade de transportar pessoas, cargas ou uma diversidade de itens, trouxe praticidade e comodidade, além de menor gasto de tempo. O efeito das grandes velocidades e das vidas transportadas, tem direcionado o desenvolvimento de sistemas capazes de preservar a integridade de seus usuários. Assim, Leal, Rosa e Nicolazzi (2012), afirmam que um desses sistemas gerados é um dispositivo capaz de parar o veículo quando e onde for necessário, em outras palavras, o sistema de freio.

Das leis da física, sabe-se que um corpo em movimento possui certa quantidade de energia cinética, a qual depende de sua massa e velocidade. De acordo com Macnaughtan (1998), na necessidade de parar ou diminuir a quantidade de movimento do veículo, é necessário dissipar a energia cinética de alguma maneira, por exemplo através do calor. Esse é o princípio de funcionamento dos sistemas de freio mais utilizados, tanto na indústria automotiva quanto em outras áreas.

Analisando pela ótica de projeto mecânico, Gradela (2013) explica que o mecanismo de freio requer que o equacionamento considere aspectos operacionais que levem ao desenvolvimento de um sistema capaz de fornecer a absorção e dissipação necessárias, podendo a geometria final apresentar diferentes características. Entre as diversas concepções, a que será tratada neste trabalho é a configuração sólida, o qual absorve grande parcela do calor.

Na tentativa de manter-se competitivo em um processo globalizado e canibal, muitos fornecedores de autopeças se veem obrigados a buscar por fornecedores de matéria prima e serviços que, segundo (GRADELA, 2013), levam a uma configuração peculiar entre características de competitividade e qualidade, na qual as reduções de custo são constantemente desejadas. Isso acarreta a busca por fornecedores de material em diversos mercados para a produção dos discos, composições químicas diferentes, processos diferenciados, entre outros fatores produtivos.

Ao deparar-se com o momento da troca do componente, o usuário encontra diversas alternativas e muitas vezes não consegue definir qual a opção mais adequada para o problema. Isso força a indústria a satisfazer o cliente, seja em qualidade ou competitividade, “[...] uma vez que o mesmo está em constante alteração de perfil” (SILVESTRE, 2012 apud GRADELA, 2013, p.1). Munidos dessas informações, muitos usuários acabam optando pela aquisição de produtos com o menor valor, sem preocupação com o desempenho. No entanto, este

componente será o responsável por cessar ou diminuir o movimento de seu automóvel, interferindo diretamente em sua segurança.

Essa diferença de valores pode não corresponder a um produto com menor capacidade de exercer sua função, entretanto, é possível que em um processo de produção, focado na redução de custo, a composição química, os materiais utilizados e os processos produtivos, possam reduzir o desempenho do sistema, além disso, pode ocorrer o desgaste prematuro. Segundo Genta e Morello (2009), menos de 2% dos acidentes rodoviários são causados por falhas no sistema de freios, entretanto, 90% desse total tem como causa a manutenção insuficiente no sistema.

Dessa maneira, este estudo pretende compreender quais são as diferenças entre alguns modelos de disco de freio do veículo Peugeot 207 XR. Utilizando-se de produtos novos, provenientes do mercado de reposição, tanto modelos de menor custo de marcas menos representativas, assim como, discos fornecidos por fornecedores oficiais da montadora, serão avaliados no intuito de buscar diferenças nas propriedades desses componentes.

O método consiste na revisão bibliográfica de literatura sobre freios e materiais utilizados na confecção dos discos de freio. Posteriormente buscar no mercado de autopeças, diferentes fornecedores de disco de freio para o mesmo modelo de veículo. Em seguida com os discos definidos, realizar testes em laboratório, dos elementos físico químicos dos discos de freio e ao final fazer uma comparação entre os dados obtidos experimentalmente com aqueles indicados pela literatura.

Baseando-se no conhecimento desses dados, a escolha por um produto de menor custo poderá ser melhor justificada, assim como o desenvolvimento de projetos futuros com o menor custo possível sem o prejuízo da perda de desempenho. De modo que para o consumidor final, as variações no seu sistema de frenagem com a utilização de diferentes discos comerciais, não sejam significativas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar algumas propriedades mecânicas do disco de freio que variam conforme o fabricante e indicar como podem afetar o desempenho de frenagem do sistema de freio.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar propriedades mecânicas de dureza, limite de tração, microestrutura, composição química, e parâmetros geométricos.
- Avaliar as diferenças químicas e mecânicas dos discos;
- Indicar possíveis relações do desempenho de frenagem com propriedades mecânicas e com o custo de aquisição.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A invenção da roda resolveu muitos problemas de transporte, pois, reduziu o atrito entre o objeto e o solo (LEAL, 2012). Entretanto, surgiu outro problema, como parar o veículo. A partir deste momento começou-se o desenvolvimento dos primeiros esboços do sistema de freio. Esses modelos de freio eram sistemas abertos, sujeitos a contaminantes como areia, água, barro, entre outros. Seu acionamento muitas vezes era realizado por alavancas próximas ao motorista, de modo que, para a operação do sistema, exigia-se a aplicação de grandes esforços de acionamento.

No veículo, o sistema de freio é parte essencial para sua utilização, permitindo seu uso de maneira segura e adequada. Dada a importância do sistema, (Kawaguchi, 2005) afirma que existem normas técnicas e legislações específicas, definidas por órgãos governamentais, as quais estabelecem requisitos mínimos de segurança, de desempenho e de esforços máximos de funcionamento exigidos dos usuários.

### **2.1 DEFINIÇÕES**

Quando um veículo está em movimento e surge uma situação de frenagem, necessita-se acionar o sistema de freio a fim de extinguir ou diminuir sua velocidade. Os princípios físicos envolvidos durante a frenagem, para o caso automotivo, baseiam-se na conversão da velocidade em calor e para melhor entender essa transformação, vamos definir alguns conceitos físicos.

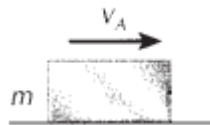
#### **2.1.1 Energia**

Para colocar um sistema em movimento se necessita de alguma fonte provedora de energia ao sistema, onde, de acordo com Çengel (2006), das leis da física, energia não é criada e sim transformada de uma forma em outra. É um conceito difícil de ser absorvido, entretanto Halliday (2008) sugere que a ideia de energia esteja profundamente enraizada em nosso cotidiano, que a aceitamos sem uma definição exata. Muito frequentemente este conceito está associado ao movimento dos corpos, assim como, também pode ser relacionado ao repouso, como por exemplo, um objeto posicionado a certa altura ou a energia disponível em baterias.

### 2.1.2 Energia cinética

Pode ser definida sucintamente como “a energia associada ao estado de movimento de um corpo com massa  $m$  e velocidade  $v$ ” (HALLIDAY, 2008, p. 329). Quando um veículo, que possui massa, está em movimento com determinada velocidade, como está representado na Figura 1, o mesmo possui energia cinética.

Figura 1 - Representação de energia de um corpo.



Fonte: Autor (2017).

Esta energia fica armazenada na forma de energia cinética durante a condição em que o veículo esteja em movimento.

### 2.1.3 Calor

Com o intuito de parar o veículo, se faz necessário a retirada da energia cinética do mesmo. Ao retirarmos sua energia, a mesma precisa assumir outra forma, que no caso do veículo, grande parte transforma-se em calor. Pode-se definir calor como “[...] a forma de energia transferida entre dois sistemas (ou entre um sistema e sua vizinhança) em virtude da diferença de temperaturas” (ÇENGEL, 2006, p. 48).

### 2.1.4 Atrito

Toda vez que um corpo escorrega sobre outro, aparece uma força chamada de atrito. Nos automóveis esse é o princípio físico mais utilizado no sistema de freios (LIMPERT, 1999). A intensidade da força depende de quanto um corpo comprime o outro e do tipo de superfície entre esses corpos (HALLIDAY, 2008).

Esses conceitos podem ser considerados para qualquer modelo de sistema utilizado pela indústria automotiva moderna, tanto em modelos a tambor quanto em modelos de freio a disco. As maiores diferenças consistem justamente na concepção do sistema de freio e em suas

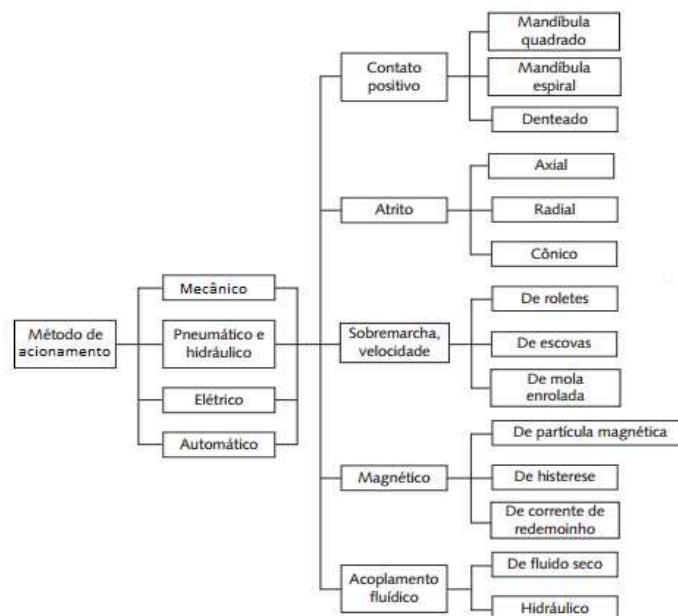
configurações, assim como os materiais utilizados e que estarão sofrendo atrito e absorvendo parte do calor gerado no processo.

## 2.2 SISTEMA DE FREIO

O freio é um dispositivo utilizado para cessar ou controlar a velocidade de movimento de sistemas. Conceitualmente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), define sistema de freio como sendo, “[...] a combinação de peças cuja função é reduzir progressivamente a velocidade de um veículo em movimento, ou fazê-lo parar, ou conservá-lo parado caso assim esteja.” Ainda, através de normas e regulamentações, o estado estipula características que devem ser atendidas para o sistema de freio de veículos comercializados no Brasil. Segundo Norton (2004), o sistema de freios provê uma conexão de atrito, que pode ser magnética, hidráulica, pneumática ou mecânica, entre dois elementos. Se um dos elementos está rotacionando e o outro encontra-se fixo com velocidade nula e o objetivo é acoplá-los de maneira que alcancem o repouso, este sistema é um freio.

Ainda de acordo com Norton (2004), podemos classificar o sistema de freio por meio da forma de atuação, pela maneira como transferem energia e pelo caráter de acoplamento, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Classificação de freios.



Fonte: Adaptado de Norton (2004, p. 961).

Os modelos de acionamento definidos por Norton (2004), são também conceituados conforme Limpert (1999),

- Freios mecânicos: Utilizam somente elementos mecânicos, como barras, cabos, eixos, para a transmissão da energia. Usualmente esses sistemas são encontrados em freio de estacionamento;
- Freios hidráulicos: Sistema que utiliza um fluido, seja ele líquido ou gasoso como meio transmissor dos esforços. O fluido gasoso é muito utilizado em veículos de grande porte;
- Freio elétricos: São sistemas que utilizam cabos elétricos para transmitir o sinal de acionamento;
- Freio misto: É um tipo que pode utilizar um ou mais dos meios de atuação.

Apesar de possibilitar diferentes formas de acionamento, os sistemas operam fundamentalmente com o mesmo princípio: gerar uma força contrária ao sentido de movimento do corpo. Existem diversas possibilidades de geração da força contrária, porém o foco deste trabalho são os freios automotivos, que se utilizam da força de atrito, convertendo a energia cinética em calor.

Freios por atrito, para que consigam executar sua função, dependem fundamentalmente dessa transformação de energia, que ocorre devido a geração do atrito, que por sua vez acontece quando pressionamos duas superfícies uma contra a outra, de maneira que o atrito gera uma força contrária ao sentido de rotação do rotor e assim ocorre a redução da velocidade angular do elemento rotativo.

Os freios que operam segundo o princípio de atrito apresentam alguns componentes principais como o rotor, o material de fricção e o mecanismo de transmissão de força. Ainda de acordo com Leal (2012) os freios dividem-se em freio a disco, freio a tambor e freio cônico, os quais são equivalentes aos sistemas axial, radial e cônico, apresentados na Figura 2. Ainda, freios cônicos, apesar de operarem com atrito, não apresentam aplicações automotivas e também não serão apresentados.

### **2.2.1 Freio a tambor**

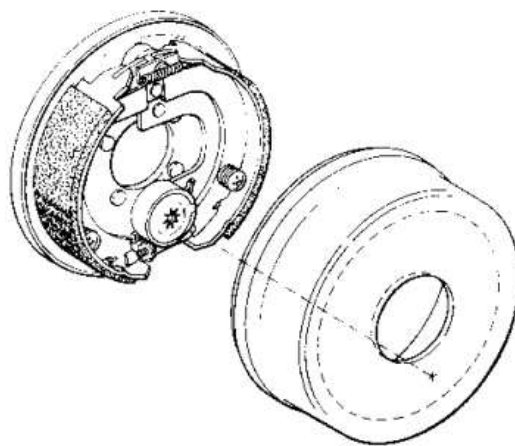
O sistema de freio a tambor é considerado o primeiro sistema de freio fechado inventado pelo homem e estima-se que tenha sido desenvolvido em meados do começo do século XX (LEAL, 2012). Por ser um sistema fechado, isolado do ambiente externo, ao mesmo tempo que previne a contaminação dos elementos atritantes por impurezas externas, que

diminuem sua eficiência, também impede que o rotor efetue a autolimpeza caso ocorra a contaminação.

Sua aplicação é muito difundida em veículos de carga, como caminhões e ônibus, assim como para veículos voltados ao mercado de baixo custo, dado seu baixo custo comparado ao sistema de freios a disco (BAUER, 2003). Vale salientar que o eixo em que o freio a tambor é aplicado nos veículos de baixo custo, usualmente é o eixo traseiro, devido a características inerentes a dinâmica veicular, as quais não entram no escopo deste trabalho, e também pela facilidade de incorporação do sistema de estacionamento.

Esse sistema apresenta, conforme Figura 3, uma quantidade maior de componentes que o sistema de freio a disco, porem são elementos de menor complexidade. Seus componentes são basicamente o cilindro de freio, o tambor, molas de retorno, as sapatas de freio e o espelho ou prato de freio.

Figura 3 - Representação do freio a tambor.



Fonte: Orthwein (2004, p. 64).

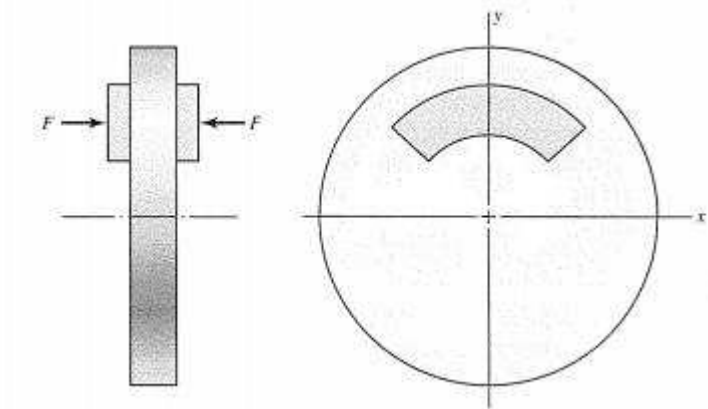
Seu princípio primordial de funcionamento consiste na geração de força de frenagem através do contato das sapatas com a lona, a qual é a superfície interna do tambor, por meio da expansão radial das sapatas, promovida pela ação do cilindro de roda.

Ainda segundo Limpert (1999), esse sistema é altamente sensível a temperaturas, não podendo exceder temperaturas entre 400°C e 500°C, tanto por degradar negativamente as propriedades atritantes, quanto pela expansão do tambor dada pela dilatação térmica, fazendo com que a área de contato entre lona e sapata diminua.

### 2.2.2 Freio a disco

O freio a disco tem ampla utilização no mercado automotivo. O funcionamento desse modelo consiste na geração de força pressionando o material de fricção contra as faces de um disco rodando (SHIGLEY, 2005), como ilustrado na Figura 4.

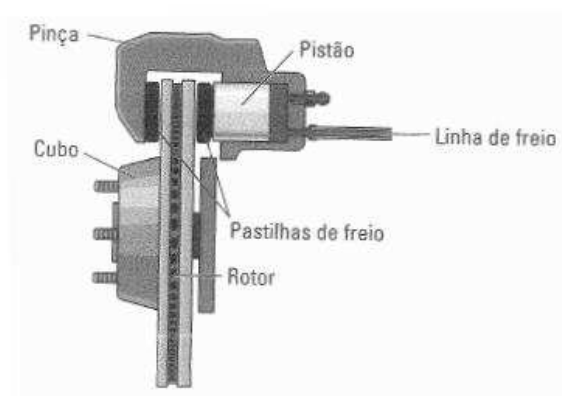
Figura 4 – Ilustração das forças pressionando o disco.



Fonte: Adaptado de Shigley (2005, p.788).

Segundo Kawaguchi (2005) para pressionar o material de fricção contra o disco é necessário realizar sua movimentação axialmente, a qual é realizada pelo embolo do conjunto freio a disco. O sistema de freio, como ilustrado na Figura 5, é constituído basicamente pela pinça de freio, também conhecida como caliper, pelo disco de freio ou rotor, pastilha de freio e pelo fluido hidráulico.

Figura 5 - Representação do conjunto de roda do freio a disco.

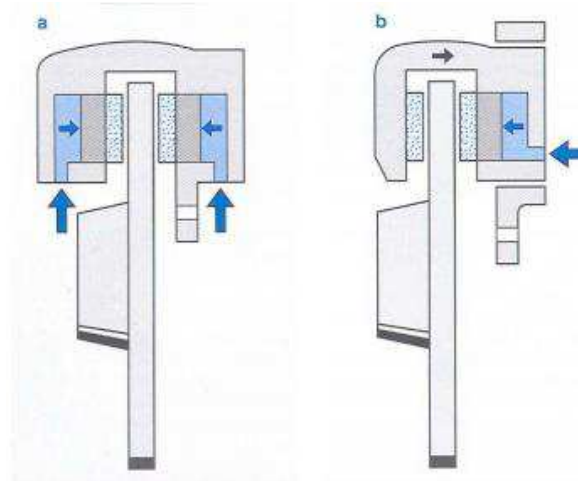


Fonte: Sclar (2015, p. 288).

Segundo Limpert (1999) a maior vantagem no uso de freios a disco é o fato de sua temperatura de operação alcançar valores em torno de  $800^{\circ}\text{C}$ , sem perder propriedades atritantes e mecânicas. Com o aumento da temperatura o sistema sofre dilatação, entretanto o aumento na espessura do disco não ocasiona folga entre disco e pastilha, como ocorre no sistema a tambor, não prejudicando assim o funcionamento e não causa perda de volume do fluido de freio, de maneira que não ocasiona nenhum aumento no curso do pedal de freio. Ainda, apresenta comportamento linear entre o torque de frenagem e o coeficiente de atrito entre pastilha e disco.

Baseado na forma construtiva os sistemas de freios a disco podem ser divididos em freio a disco tipo fixo ou freio a disco flutuante, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Tipo de freio a disco: (a) tipo fixo; (b) tipo flutuante.



Fonte: Kawaguchi (2005, p. 25).

O sistema do tipo fixo apresenta, usualmente, dois êmbolos, um em cada lado do disco. Ao pressurizar-se o sistema, os êmbolos movimentam as pastilhas contra o disco, que ao entrar em contato com o disco geram atrito. No modelo tipo flutuante, é mais comum a presença de um êmbolo, “o qual movimenta a pastilha contra o disco e como reação, a pressão do sistema faz com que a carcaça da pinça se desloque no sentido contrário ao êmbolo” (LIMPERT, 1999), movimentando a pastilha do outro lado. O modelo de freio a disco flutuante apresenta uma geometria menos complexa que o fixo, como pode-se perceber na Figura 6, dessa maneira seu custo acaba sendo inferior.

## 2.3 DISCO DE FREIO

Disco de freio pode ser definido como um disco plano que propicia a superfície necessária para que, em contato com o material atritante, ocorra o atrito esperado e o sistema de freio possa efetuar sua função de maneira adequada (HEISLER, 2002).

Existem diversos modelos de disco de freio implementados nos automóveis, os quais variam suas características geométricas e naturalmente cada modelo apresenta propriedades de desempenho distintas. Eles podem ser sólidos, ventilados, perfurados, ranhurados ou qualquer combinação entre estes modelos.

Segundo Rao (2008), elementos girantes durante seu movimento, tendem a produzir forças devido a massas desbalanceadas, tais forças acabam induzindo vibrações indesejadas no sistema, podendo prejudicar o funcionamento do mesmo, ou então no caso de veículos causar mal-estar aos seus ocupantes. Como são elementos girantes, os discos de freio estão sujeitos as vibrações causadas por massas desbalanceadas, de maneira que, a exigência por projetos mais requintados e processos produtivos com melhor controle elevam o custo final desses componentes.

### 2.3.1 Disco Sólido

Como seu próprio nome induz, são discos inteiriços e maciços, como ilustrado na Figura 7. Esse modelo é o que menos apresenta vibrações durante o funcionamento, pois apresenta uma distribuição mais uniforme da massa total

Figura 7 - Disco de freio sólido.



Fonte: Jocar (2016).

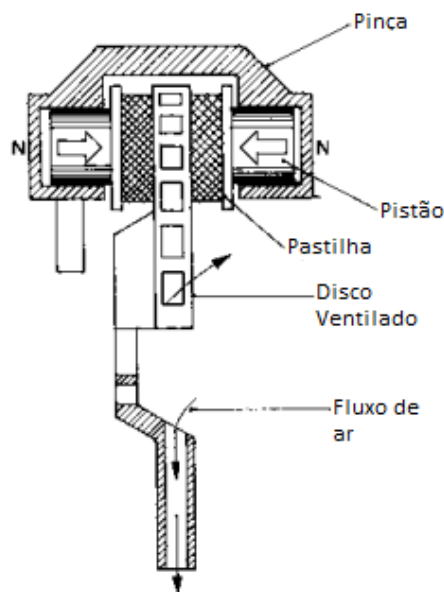


São os modelos que apresentam a menor área de contato com o ar ambiente, dessa maneira são os modelos que menos dissipam calor. Este tipo é muito utilizado em veículos de categorias de menor valor agregado, com motores de pouca cilindrada e de pouco peso, de maneira que veículos com essa configuração não alcançam valores elevados de velocidade, de maneira que a energia pode ser dissipada completamente com um rotor sólido, sem perda considerável nas propriedades.

### 2.3.2 Disco Ventilado

Esse modelo de disco apresenta-se como uma evolução do modelo anterior. Foi desenvolvido de maneira que a dissipação do calor gerado pelo atrito fosse incrementada. São usualmente utilizados em veículos com potência e peso mais elevados do que aqueles aos quais são aplicados os discos sólidos. Sua geometria foi concebida de maneira a introduzir aletas entre as superfícies de contato que fazem contato com o elemento atritante, como é representado pela Figura 8, onde o elemento chamado de *Pad* é o elemento atritante.

Figura 8 - Vista frontal de um Sistema de freio com disco ventilado.



Fonte: Heisler (2002, p. 456).

De acordo com a esquematização representada na Figura 8, onde duas placas delgadas de metal são unidas entre si, formando as aletas. A refrigeração do sistema, de acordo com Heisler (2002), é incrementada graças as forças centrífugas existentes devido a rotação do disco,

as quais força a passagem do fluxo de ar entre as chapas, garantindo assim maior contato com o ar ambiente e facilitando a troca de calor.

Apesar de à primeira vista o sistema parecer mais pesado que o disco sólido, devido aos canais internos, usualmente apresenta menor massa quando comparado a discos sólidos equivalentes. Em função de sua menor massa e absorvendo a mesma quantidade de calor, o disco acaba esquentando mais rapidamente, entretanto suas aletas permitem uma maior troca térmica, cerca de 70% a mais que discos sólidos (HEISLER, 2002), causando um rápido resfriamento e consequente menor temperatura de operação.

### 2.3.3 Disco Perfurado

Normalmente, esse tipo de disco de freio equipa sistemas de alta performance, como veículos de competição ou motocicletas. Essa geometria utiliza a base do sistema de disco ventilado, porém acrescenta, além das aletas internas, furos perpendiculares ao longo das superfícies atritantes, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Ilustração de disco ventilado e perfurado juntamente com o caliper.



Fonte: Genta (2009, p. 278).

As pastilhas de freio em função das altas temperaturas geradas na frenagem, depositam material sobre o disco. A superfície fica superaquecida e prejudica a eficiência do sistema de freio. A adoção de furos aumenta ainda mais a área de contato com o ar, além da limpeza da superfície do par de atrito. Pensando que este tipo de disco é mais comumente empregado em veículos de competição, os quais alcançam altas velocidades e consequentemente uma elevada rotação do rotor, deve-se atentar, durante as fases de projeto e manufatura, para que o posicionamento das perfurações seja o melhor possível, pois o mínimo deslocamento de uma

das perfurações em relação as outras é capaz de produzir vibrações que podem ser nocivas ao sistema.

#### **2.3.4 Disco Ranhurado**

São muito aplicados também em sistemas de alta performance. As ranhuras são usinadas na superfície do disco, de forma a permitir uma melhor limpeza da superfície de atrito. Assim como o modelo perfurado, é construído tomando como base o modelo ventilado, como pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 10 - Disco de freio ranhurado.



Fonte: AeClassic (2014).

Utilizando do mesmo princípio da força centrífuga que induz o ar para as aletas, esse modelo apresenta grande capacidade de autolimpeza e também eliminação de água. Um dos maiores problemas neste modelo de disco consiste em balancear corretamente sua massa, principalmente no momento da manufatura das ranhuras, as quais apresentam uma geometria complexa.

#### **2.3.5 Pastilha de Freio**

Esse componente é utilizado para freios do modelo a disco. É configurado basicamente por dois componentes, uma placa metálica que serve de suporte e elemento de fixação e o material de atrito, o qual no momento da frenagem entrará em contato direto com o rotor, gerando o atrito necessário. Fica alocada na pinça de freio e estaticamente, a medida que o sistema de freio é acionado ela entra em contato com o rotor, tornando-se o elemento principal de desgaste do rotor.

Assim como no rotor, o elemento atritante deve atender certas propriedades mecânicas, a fim de garantir distância de frenagem e segurança dos passageiros do veículo. Suas principais

necessidades seriam a resistência a fadiga mecânica e térmica, resistência a compressão, dureza adequada, capacidade de cisalhamento e ainda capacidade de isolamento térmico, de maneira que evite a transferência de calor a placa metálica de fixação. Lembrando que para cada tipo de veículo há uma exigência, a depender de peso, velocidade, uso, entre outros.

### **2.3.6 Modos de Falha**

O sistema de freio, assim como os demais pertencentes ao veículo, passa por um processo de desgaste e degradação de suas propriedades com sua utilização. Dessa maneira o aparecimento de problemas torna-se inevitável. Podemos definir quatro problemas usualmente apresentados pelo sistema de freio a disco, são eles: deformações, aquecimento dos mancais, ruídos e trincas. Anderson (1990) afirma que os sistemas de freio em determinadas condições de uso podem sofrer com deformações térmicas devido aos ciclos de frenagem, como o empenamento do disco, causando assim vibrações no sistema e perda de desempenho.

O calor absorvido pelos discos de freio devem ser dissipados por ele de alguma maneira. Como está em contato direto com outros elementos dos sistema de freio, parte do calor é transferido para os demais componentes do sistema de freio. Leal (2012), indica que esse calor conduzido, leva ao aquecimento dos rolamentos de roda, prejudicando sua lubrificação, afetando sua vida. Também trata do aquecimento do fluido de freio, o qual acaba deteriorando as borrachas de vedação do conjunto, podendo levar a falhas no mecanismo. Ainda como efeito da temperatura, Mackin (2002) relata que discos de freio estão expostos a grandes tensões térmicas durante sua operação, principalmente em situações de grandes desacelerações, onde esses momentos aquecem o disco rapidamente, levando ao choque térmico, podendo surgir trincas.

Uma condição que incomoda bastante o ser humano são barulhos. Por estarem em contato entre si, disco e pastilhas, podem ocorrer ruídos provenientes do atrito entre esses componentes. Com o uso de novos componentes com maior resistência ao desgaste e distintos materiais atritantes sem a presença de asbesto, são aqueles que produzem maior quantidade de ruído. (LEAL, 2012). Por fim, o sistema pode apresentar ainda outros mecanismos de falha, mas que não serão abordados neste trabalho.

### 2.3.7 Material

O material deve ser capaz de suportar os esforços inerentes ao sistema bem como resistir a fadiga térmica, a qual é induzida no sistema devido aos ciclos de frenagem, que ora transfere calor ao disco esquentando-o e ora o disco transfere calor ao ambiente, resfriando-se.

Os discos de freio produzidos, em sua grande maioria, são confeccionados em ferro fundido, podendo ser ainda de aço carbono ou aço inoxidável (ORTHWEIN, 2004). Ainda de acordo com Santos (1989), o ferro fundido pode ser classificado no Brasil de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação do ferro fundido no Brasil.

Tipo de ferro fundido	Microestrutura típica	Comentários
<b>Branco</b>	Todo carbono presente na liga encontra-se na forma de cementita ou outros carbonetos metálicos.	A sequência de solidificação e a microestrutura desses materiais podem ser interpretadas pelo diagrama de equilíbrio metaestável (Fe-Fe <sub>3</sub> C), com as modificações necessárias em virtude da presença de outros elementos de liga.
<b>Cinzento</b>	As fases formadas na solidificação são austenita e grafita, conforme diagrama de equilíbrio estável, onde se obtém grafita em forma de veios.	Distinguem-se os teores de carbono grafitico e carbono combinado, cuja soma fornece o teor total de carbono desses ferros fundidos.
<b>Mesclado</b>	Quando a solidificação resulta na formação de regiões de ferro fundido branco e cinzento.	A região com ferro fundido cinzento se solidificou conforme o sistema estável (austenita-grafita) e a região com ferro fundido branco segundo o metaestável (austenita-carboneto).
<b>Nodular</b>	A grafita se apresenta na forma de nódulos no estado bruto de fusão.	Esta forma é decorrência da adição de certos elementos químicos ou condições particulares de fabricação, que modificam a forma de crescimento da grafita, não se obtendo grafita em veios como nos ferros fundidos cinzentos.
<b>Maleável</b>	Solidificam como nos ferros fundidos brancos, sendo posteriormente submetidas a um tratamento térmico (maleabilização), onde a cementita se decompõe em grafita e austenita.	Recebem, também a designação de ferros maleáveis de núcleo preto ou americano, e, ferro maleável de núcleo branco ou europeu.
<b>Vermicular</b>	Obtém-se, no estado bruto de fusão, através da adição de elementos de liga, a chamada grafita vermicular.	Esta morfologia é um produto intermediário entre a grafita em veios e a nodular.

Fonte: Santos (1989).

De acordo com Guesser (2003) na norma EN 1561/1997 o ferro fundido pode ser classificado de acordo com o limite inferior de resistência a tração, conforme Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação de ferros fundidos de acordo com a resistência mecânica.

Característica			Classe (EN-GJL-)				
			150	200	250	300	350
Matriz			Ferrítico/ perlítica	perlítica			
Límite Resistência	Rm	MPa	150-250	200-300	250-350	300-400	350-450
Límite Escoamento	Rp <sub>0,1</sub>	MPa	98-165	130-195	165-228	195-260	228-285
Alongamento	A	%	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3
Resistência compressão	$\sigma_{db}$	MPa	600	720	840	960	1080
LE compressão	$\sigma_{d,0,1}$	MPa	195	260	325	390	455
Resistência flexão	$\sigma_{dB}$	MPa	250	290	340	390	490
Resist cizalhamento	$\sigma_{sB}$	MPa	170	230	290	345	400
Resistência torção	$\tau_{dB}$	MPa	170	230	290	345	400
Módulo Elasticidade	E	GPa	78-103	88-113	103-118	108-137	123-143
Coefficiente Poisson	$\nu$	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Resist. Fadiga Flexão	$\sigma_{bW}$	MPa	70	90	120	140	145
Resist Fadiga Tração-Compressão	$\sigma_{2dW}$	MPa	40	50	60	75	85
Tenacidade à Fratura	K <sub>IC</sub>	(MPa) <sup>1/2</sup>	320	400	480	560	650




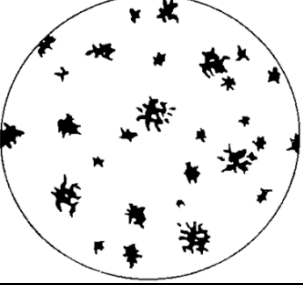
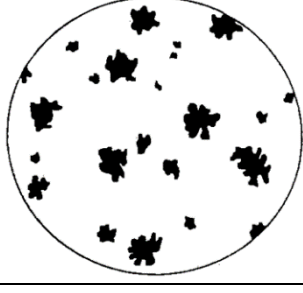
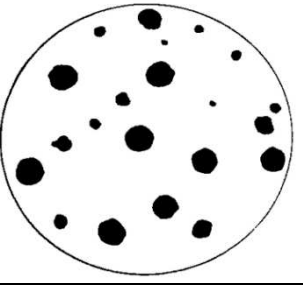
Fonte: Guessser (2003).

Nas últimas décadas um grande esforço vem sendo desenvolvido com o intuito de maximizar o poder de fricção dos discos de freio, isso inclui a utilização de materiais não ferrosos como alumínio e compósitos de carbono (CHO et al., 2002). Segundo Orthwein (2004), discos de freio de carbono podem suportar temperaturas de operação em torno de 3000°C e não apresenta derretimento em condições de pressão atmosférica, tornando este material forte candidato a utilização em condições mais extremas, como veículos de competição ou no sistema de frenagem de aeronaves.

O processo de seleção do material a ser utilizado no disco de freio, deve levar em consideração os esforços e propriedades que o material deve apresentar em operação, tais como fadiga, amortecimento, desgaste, condutividade térmica e resistência mecânica. Guessser et al. (2003), afirma que algumas dessas propriedades são fortemente influenciadas pela grafita, assim como pela matriz constituinte do material.

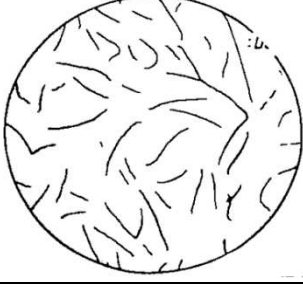
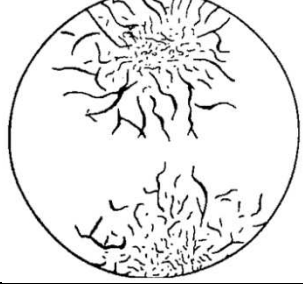
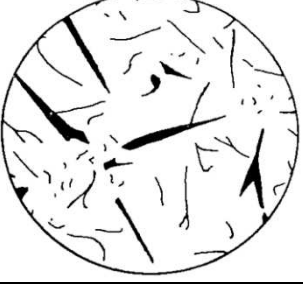

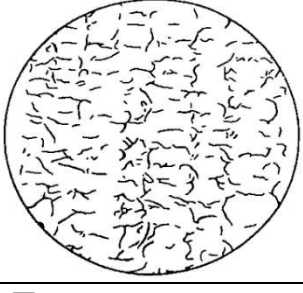
Ainda de acordo com a norma VDG Merkblatt P441 (1962), a grafita pode ser classificada de acordo com sua forma, tipo e tamanho. Nas Tabela 1, 2 e 3 são apresentadas ilustrações de tais parâmetros.

Tabela 1 - Classificação da forma da grafita.

		
Forma <b>I</b> - Lamelar	Forma <b>II</b> - Roseta	Forma <b>III</b> - Vermicular
		
Forma <b>IV</b> - Semi-compacta (Recozimento)	Forma <b>V</b> - Compacta (Recozimento)	Forma <b>VI</b> - Nodular (Esferoidal)

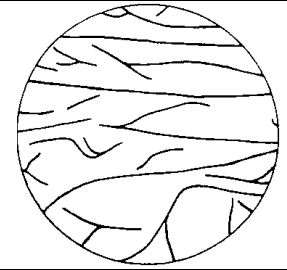
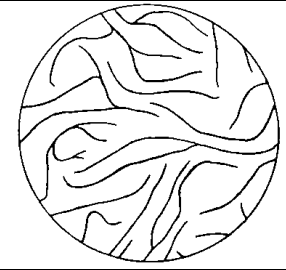
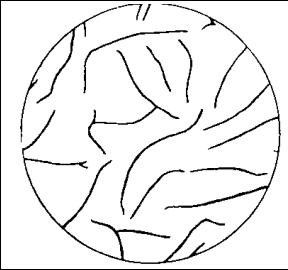
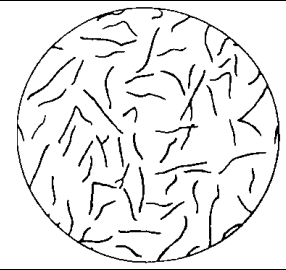
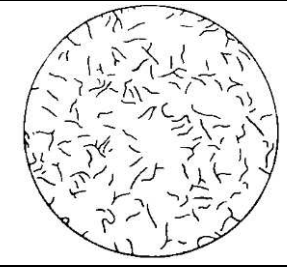
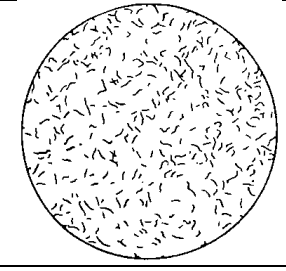
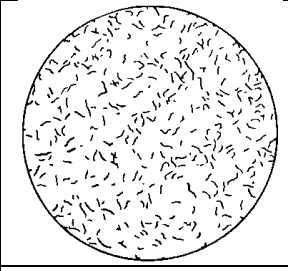
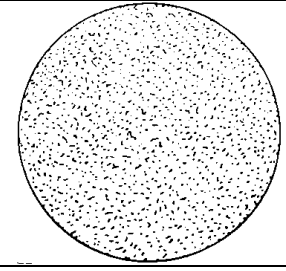
Fonte: VDG Merkblatt P441 (1962).

Tabela 2 - Classificação do tipo da grafita - forma I.

		
Tipo <b>A</b> - Lamelar (100X)	Tipo <b>B</b> - Roseta (100X)	Tipo <b>C</b> - Hipereutética (100X)
		
Tipo <b>D</b> - Eutética (Interdendrítica) (100X)	Tipo <b>E</b> - De Superresfriamento (100X)	

Fonte: VDG Merkblatt P441 (1962).

Tabela 3 - Classificação do tamanho da grafita - forma I .

			
Tamanho <b>1</b> (100X)	Tamanho <b>2</b> (100X)	Tamanho <b>3</b> (100X)	Tamanho <b>4</b> (100X)
			
Tamanho <b>5</b> (100X)	Tamanho <b>6</b> (100X)	Tamanho <b>7</b> (100X)	Tamanho <b>8</b> (100X)

Fonte: VDG Merkblatt P441 (1962).

De acordo com Macnaughtan (1998), ao longo dos anos diversos materiais tem sido testados, tais como ferro fundido cinzento com grafita em flocos, ferro fundido cinzento granular e ferro fundido cinzento compacto. Guesser et al. (2003), afirma que no Brasil existe a tendência em produzir discos de freio com alta concentração de carbono, de alta condutividade térmica e assim alta quantidade de grafita.

Ainda segundo Maluf et al. (2007), o ferro fundido é indicado para a produção de discos de freio, dada sua usinabilidade, capacidade de amortecimento de vibrações e ruídos, baixo custo de produção e excelente condutividade térmica, a qual é influenciada diretamente com a distribuição da grafita, tamanho e morfologia da grafita. A grafita é uma das formas na qual o carbono presente no material pode assumir e sua geometria depende diretamente dos processos produtivos aplicados durante a obtenção do material.

## 2.4 ESTADO DA ARTE

Em seu trabalho, Cueva (2003), estuda e compara três diferentes tipos de ferro fundido cinzento, que são utilizados em discos de freio, com o ferro fundido vermicular. É realizado um estudo de desgaste nos materiais, onde os testes foram conduzidos utilizando um tribômetro do tipo pino sobre disco, com o pino sendo confeccionado de pastilhas de freio normalmente



utilizadas em camionetes. Explica ainda a metodologia de coleta de dados e as temperaturas alcançadas juntamente com as forças de fricção geradas.

Já Hecht (1999), avaliou a difusividade térmica em ferros fundidos de acordo com morfologia da grafita, composição química e temperatura no material. O estudo contou com amostras usinadas de protótipos e também discos comerciais. Nesta obra informa-se que a difusividade térmica é incrementada com o percentual de carbono e está fortemente ligada ao comprimento da grafita.

Neste trabalho, o centro do estudo consiste na avaliação e comparação de características físicas e mecânicas entre discos de freio de diferentes fornecedores que atuam no mercado de reposição. Assim como os trabalhos citados, utilizou-se de técnicas experimentais para determinar as características do material objeto de estudo. Diferentemente do estudo entre distintas composições químicas, que apontam as qualidades de cada composição, foi realizada a análise do material fruto do processo de fabricação de cada fornecedor. De tal maneira, o propósito foi estudar como o processo produtivo e as técnicas implantadas na produção de discos de freio, podem gerar diferenças, por menor que sejam, na microestrutura e nas características mecânicas dos discos de freio e justificar, em partes, a diferença de valores na venda de produtos similares para o consumidor final.

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção será apresentado o objeto de estudo e a razão do modelo escolhido, o que será analisado, caracterizações do material de estudo e também métodos de ensaio a serem utilizados para obtenção dos dados.

Foram realizados ensaios que sejam representativos de uma situação real. Utilizou-se discos oficiais e também opções paralelas oriundas do mercado de reposição, buscando encontrar diferenças entre as propriedades de cada um dos discos, dado seu custo. Todos os procedimentos de laboratório foram realizados com auxílio de um colega mestrando do Centro Tecnológico de Joinville, nos laboratórios da empresa onde trabalha.

#### 3.1 SELEÇÃO DOS DISCOS DE FREIO

O objeto de estudo deste trabalho são discos de freio sólidos aplicados no sistema de freio de automóveis. Tendo em mãos um par de discos de freio usado, sendo que a distância aferida no hodômetro do veículo no momento da troca do par de disco, apontava oitenta mil quilômetros, onde com esta quilometragem foram completadas aproximadamente 53 milhões de revoluções, considerando as características originais do veículo.

Estes discos são utilizados no veículo 206, modelo XR com motorização 1.4 litro da fabricante Peugeot. Partindo desta premissa, decidiu-se pelo estudo de algumas propriedades de produtos novos de diferentes fornecedores e do disco usado disponível, ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Disco de freio usado com 80 mil quilômetros.



Fonte: Autor (2017).

É um modelo que se enquadra na categoria de disco sólido sem elementos adicionais de limpeza ou refrigeração, conforme Figura 7.

A aquisição dos elementos foi feita em comércios da região de Joinville, Santa Catarina, diretamente no balcão dos estabelecimentos, representando o usuário final. Foram adquiridos, além do modelo usado, três pares novos de disco de freio, sendo um fornecido diretamente pela concessionária da marca do veículo que utiliza este modelo de disco e os outros dois foram adquiridos em marcas do mercado de reposição, onde uma delas é reconhecida como fornecedora oficial de peças de reposição, enquanto a última marca não apresenta reconhecimento oficial da montadora, apenas dispõe do produto no mercado, não possuindo o mesmo nível de representatividade no mercado.

Para elaboração e ordem dos ensaios, os discos foram classificados de acordo com as iniciais de seus fabricantes, onde os ensaios realizados e os resultados apresentados devem seguir a ordem previamente estabelecida. Os discos foram nomeados com a seguinte ordem: Disco H, Disco F, Disco PO e Disco PU, sendo respectivamente, o de menor custo de aquisição, da fornecedora oficial, da concessionária e o da concessionária usado. Importante salientar que os discos PO e PU são ambos provenientes do mesmo fabricante, porém o disco PU apresenta a condição de fim de vida e o disco PO sendo novo.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS DISCOS DE FREIO SÓLIDOS

Neste tópico serão abordados os métodos utilizados para obtenção dos dados de cada uma das propriedades buscadas. São apresentadas imagens dos equipamentos e também dos elementos sob ensaio, assim como, as etapas tomadas durante a realização do experimento

### 3.2.1 Medições de grandezas geométricas e massa

Em um primeiro momento foram analisados parâmetros da geometria do objeto, elementos como largura, comprimento, espessuras, diâmetros de furos, entre outras características geométricas que possam ser medidas. Primeiramente devem ser identificados os lados do par de discos, atribuindo ao lado direito marcação que não altere ou interfira nas propriedades do objeto. Utilizou-se uma tira de papel a qual foi grampeada no orifício central, não interferindo nas medições.

Para realizar as medições geométricas, foi utilizado um paquímetro universal em milímetros, com resolução de 0,02 milímetros. Dentro de um ambiente sem interferências externas, os discos foram retirados de suas embalagens e então posicionados sobre a bancada, que estava coberta com papel branco. As superfícies estavam cobertas com uma fina camada de óleo protetor, efetuou-se a limpeza das mesmas utilizando-se papel toalha, de maneira a não provocar o deslizamento das garras de medição do paquímetro.

Realizaram-se quatro medidas para cada parâmetro de diâmetro e para medidas de comprimento ou largura foram quatro medições alternando-se entre quatro pontos distintos do disco. Feito isso, deve-se realizar a média dos resultados e considerar esta como valor geométrico final para cada disco analisado.

No modelo usado deve-se realizar a medida da espessura do anel externo sobressalente, região onde não ocorre o contato entre disco e pastilha. Posteriormente deve-se medir a altura do material em excesso em relação a superfície do disco, nos dois lados do modelo, sendo depois subtraído as alturas da espessura, obtendo-se a espessura total da superfície de atrito do disco usado.

Após realizada as medições geométricas, deve-se então fazer a medição da massa de cada disco. Para isso utilizou-se uma balança com capacidade máxima de 120kg, da marca Toledo com resolução de 0,01kg, representada na Figura 12. Importante salientar que os

instrumentos não apresentavam dados de calibração, mas por ser um trabalho comparativo, o erro se houver se propagou em todas as medições das diferentes amostras.

Figura 12 - Balança usada na medição.



Fonte: Autor (2017).

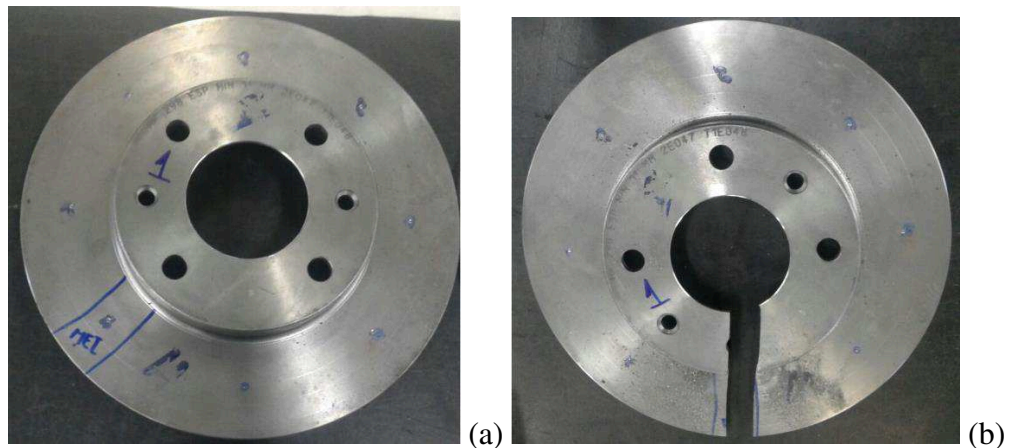
Primeiramente liga-se o instrumento e aguarda-se até seu zeramento automático, então para cada elemento a ser medido faz-se três medições, posicionando o disco em três posições distintas do prato da balança, de maneira a evitar possíveis vícios do instrumento. De frente para a balança, temos a primeira posição mais a frente, a segunda no meio e por último mais ao fundo do prato a última medida, ao final tira-se a média dos valores e considera-se este como valor final.

### **3.2.2 Caracterização química dos materiais dos discos**

O processo de medição química dos corpos de prova se deu através do processo da combustão e da espectrometria de emissão óptica (OES), onde no primeiro é analisado somente o percentual de carbono no corpo de prova (cp) e no segundo método todos os demais elementos foram analisados. De acordo com norma interna do laboratório, uma pequena porção do disco

de freio a ser avaliado deve ser removida da peça inteira, sendo então chamada corpo de prova. Para isso deve-se sinalizar a região do disco a ser removida, neste caso torna-se indiferente qual será utilizada, assumindo a homogeneidade do disco de freio, entretanto, a mesma deve ser no sentido radial e deve englobar toda a superfície do disco, como mostra a Figura 13, onde (a) representa a demarcação da região a ser cortada e (b) ilustra o material com a remoção do corpo de prova. Utilizou-se de serra circular manual para remoção das regiões e posterior acabamento nas amostras para torná-las simétricas entre si.

Figura 13 - Disco com marcação da área a ser removida e disco com remoção do corpo de prova.



Fonte: Autor (2017).

De acordo com norma interna do laboratório, que instrui os procedimentos de pesagem, a massa da amostra deve ser de  $\pm 0,200\text{g}$ , sendo pesada com balança analítica. Este processo deve ser realizado em cadinho de cerâmica já calibrado na balança e com massa de 1 a 1,5 gramas de fundente. Na Figura 14 temos a ilustração das amostras removidas de cada um dos quatro discos analisados.

Figura 14 - Corpos de prova para análise de carbono e metalográfica.



Fonte: Autor (2017).

De preferência as amostras devem ser removidas em regiões similares, como é o caso da região dos orifícios de fixação do disco, de maneira que variações que possam ocorrer durante a fabricação e que sejam causadas pela presença do orifício possam ser igualmente representadas nas amostras. O equipamento utilizado neste processo pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 - Máquina medição do percentual de carbono por combustão.



Fonte: Autor (2017).

O processo do teste de combustão é bastante simples, a amostra é inserida em uma atmosfera de oxigênio puro geralmente a 1350°C. Devido a alta temperatura e o oxigênio

presente na câmara, ocorre a combustão e os elementos presentes na amostra sofrem uma oxidação-redução, que gera a liberação de carbono e enxofre. O carbono então oxida-se formando o gás  $CO_2$  e os gases provenientes da queima são detectados por células que medem as concentrações, convertendo tais valores em percentuais, de acordo com a calibração do equipamento.

Para o ensaio de espectrometria de emissão óptica, as amostras do material são bombardeadas com energia através de uma fonte. Ao receber essa descarga de energia, elétrons existentes no material se deslocam para órbitas com energia superior, levando os átomos para um estado de excitação. Retirando-se a fonte de energia, os elétrons tendem a regressar a suas órbitas de menor energia, emitindo ondas eletromagnéticas com diferentes comprimentos de onda, caracterizando os elementos químicos, que são identificados através do comprimento de onda detectado e sua quantidade através da intensidade da onda.

Para a análise precisa de carbono, o método OES não deve ser considerado, pois o processo de bombardeamento de energia acontece sempre no mesmo local, de maneira que o fluxo de energia pode ser direcionado para uma região com menor ou maior concentração de grafita, consequentemente tem-se diferença nos valores medidos entre regiões, ao passo que o método da combustão, o material é analisado de maneira homogênea.

### **3.2.3 Caracterização metalográfica dos materiais dos discos**

Existem inúmeras técnicas para observar a estrutura de materiais metálicos como os aços e ferros fundidos. Entre as possibilidades, foi adotada a técnica da microscopia ótica, sendo selecionada por duas razões: a disponibilidade do equipamento na empresa e por ser comumente utilizada no estudo da microestrutura de ferros fundidos (COLPAERT, 2008). As amostras foram obtidas recortando-se um quadrado da pista de atrito dos corpos de prova representados na Figura 14 (cps de combustão), onde o corte foi perpendicular à porção da pista de atrito presente no cp, expondo assim a estrutura interna do material.

O preparo da superfície baseou-se em, após o corte, limpar as amostras com água e então realizar lixamento da superfície que será analisada. Nos processos de lixamento foram utilizadas três gramaturas de lixa, começando com 600, depois 800 e por fim gramatura 1200, sempre lavando as amostras entre as etapas. Após o processo de lixamento, as amostras foram submetidas ao processo de polimento com pasta de diamante, para eliminar possíveis marcas



superficiais deixadas no processo de lixamento, lavando-as ao final com álcool e secando com ar quente.

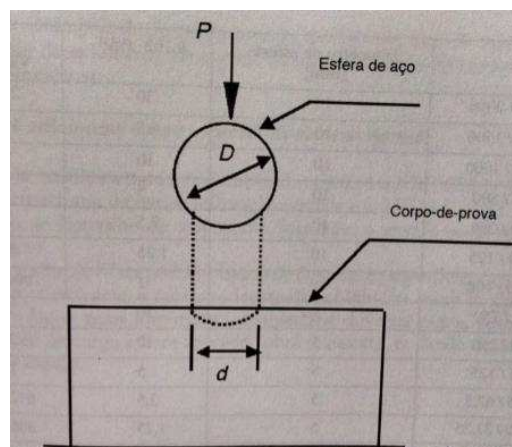
Foi utilizada como base do procedimento a norma alemã VDG Merkblat P441 (1962), que classifica a forma, o tipo predominante da forma e tamanho da grafita de acordo com as Tabela 1, Tabela 2 e 3 descritas no item 2.3.6.

A execução da técnica deve ser realizada em duas etapas similares, porém, diferenciando-se por um processo intermediário, que é realizado na superfície do material. A primeira fase consiste na análise do material após lixamento e polimento, objetivando avaliar e quantificar a morfologia da grafita. A segunda, consiste em aplicar um reagente químico, que neste teste foi o reagente Nital 3%, com o objetivo de revelar sua matriz metálica. Essas duas etapas fornecem imagens da fração volumétrica da grafita e de sua matriz metálica.

### 3.2.4 Caracterização mecânica dos materiais dos discos

O ensaio de dureza consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça, realizada pela aplicação de pressão juntamente com marcador de penetração. O teste pode ser classificado dependendo do tipo da ponta do penetrador utilizada na medição. Neste trabalho foi utilizado o método de dureza Brinell, o qual consiste em comprimir uma esfera de aço temperado ou de carbeto de tungstênio contra a superfície da amostra, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Representação do ensaio de dureza Brinell.



Fonte: GARCIA (2000 p. 71).

Com base na representação acima, o valor da dureza pode ser obtido pela razão entre a carga aplicada com a área da calota esférica, conforme a equação 1.

$$dureza = \frac{P}{S} \quad 1$$

Onde: dureza é expressa em termos de tensão [Pa];

P = carga de impressão [N];

S = área da calota esférica impressa [mm<sup>2</sup>].

Ao introduzir-se a superfície da calota esférica na equação 1, tem-se:

$$HB = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot P}{(\pi \cdot D) (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad 2$$

Onde:

D = diâmetro do penetrador [mm];

d = diâmetro da impressão [mm].

O material a ser utilizado na extremidade do penetrador depende da faixa de dureza do material a ser submetido ao ensaio. Ainda segundo Garcia (2000), utilizam-se esferas de tungstênio para materiais com faixa de dureza entre 450 HB e 650HB. No presente estudo utilizou-se um penetrador com ponta de aço, pois, de acordo com dados de experimentos similares do laboratório de testes, a faixa de dureza padrão para discos de freio equivalentes tem valores entre 197 a 248 HB. O diâmetro da esfera utilizada foi de 5mm e aplicou-se uma carga no valor de 750kgf.

De modo a cobrir possíveis falhas no processo de fabricação, que possam ter ocasionado áreas com desuniformidade no material, decidiu-se pela marcação de oito pontos na região de atrito com a pastilha de freio, realizando-se as medidas conforme marcação preestabelecida, que podem ser observadas na Figura 17.

Figura 17 - Posições de medições de dureza Brinell.



Fonte: Autor (2017).

As marcações foram feitas igualmente espaçadas de maneira circular sobre a superfície de contato. Marcou-se apenas um lado das superfícies atritantes e foi realizada apenas uma medição para cada marcação. O processo está representado na Figura 18. Este procedimento não exige processo distinto de preparação da superfície, apenas limpeza suficiente a remover impurezas superficiais.

Figura 18 - Amostras sob teste de dureza Brinell.



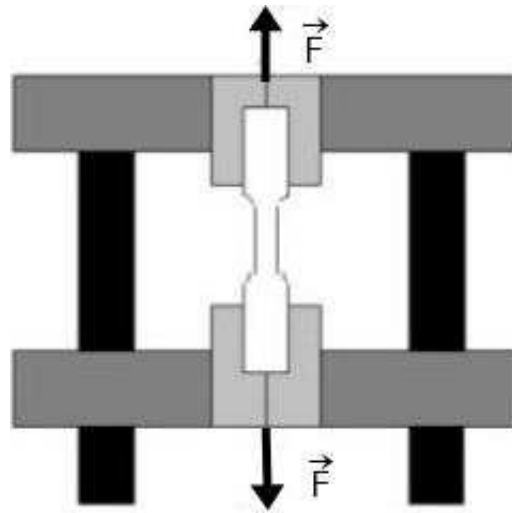
Fonte: Autor (2017).

Conforme a Figura 18, os discos foram repousados sobre superfície plana lisa e de área no mínimo duas vezes maior que a própria área do disco. Feitos os ensaios, obteve-se a média

dos valores medidos em cada uma das marcações, de dureza de cada disco para posterior comparação entre os distintos modelos.

Ainda no processo de caracterização mecânica dos discos de freio, realizou-se um ensaio de tração. O ensaio de tração resume-se na aplicação de uma força crescente no sentido axial de um corpo de prova definido e estabelecido segundo norma NBR 6891-1, até que ocorra a ruptura do elemento (GARCIA, 2000). De maneira a facilitar o entendimento, na Figura 19 está ilustrado um corpo de prova genérico.

Figura 19 - Esquemática do ensaio de tração.



Fonte: Rosa (2017).

Com base nos atributos iniciais mede-se a variação no comprimento em função da carga aplicada. Com os dados obtidos, podem ser obtidos valores quantitativos de algumas características mecânicas, tais como o limite de resistência a tração, limite de escoamento, ductilidade, etc. Este ensaio fica regido por normas técnicas convencionais, sendo que cada país ou região estipula quais devem ser adotadas em seu território. No Brasil a norma que caracteriza tal ensaio, para materiais metálicos, é a NBR ISO 6892-1, determinada pela ABNT, a qual baseia-se na norma ASTM A370, cujo procedimento foi adotado neste ensaio.

Para realização deste procedimento foram confeccionados três corpos de prova de cada disco a ser analisado, os quais atendem os padrões definidos na norma. As amostras foram retiradas da pista do disco de freio, em posições separadas entre si de 90 graus. A Figura 20 representa vista superior da região a ser transformada em corpo de prova.

Figura 20 - Demarcação da região a ser analisada.



Fonte: Autor (2017).

O resultado a ser considerado para cada elemento do estudo é a média dos três ensaios realizados. Na figura acima está ilustrado modelo genérico para méritos de entendimento, pois não foi possível a obtenção de imagens dos corpos de prova para este teste. É importante salientar que todos os experimentos realizados, com exceção do ensaio de combustão, foram realizados à temperatura ambiente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os dados obtidos a partir das práticas experimentais realizadas. É importante salientar que a ordem de apresentação dos resultados segue a sequência estabelecida anteriormente, organizados por ordem alfabética.

### 4.1 ANÁLISE DOS PRODUTOS ADQUIRIDOS

Primeiramente temos o par de discos de menor custo de aquisição, os quais foram chamados de disco H. Apresenta certa aspereza ao toque e veio coberto com pequena camada de óleo. Visualmente tem coloração uniforme e acinzentada, apresentando ainda raias circulares na superfície onde ocorre o contato direto com a pastilha de freio, possivelmente devido ao processo de desbaste da superfície para dar o acabamento. Ainda, apresenta indicações de lote, espessura mínima e código do produto. Pode ser visualizado na Figura 21 que o produto apresenta algumas manchas, as quais são provenientes da camada de óleo protetora que acompanha o produto.

Figura 21 - Disco de freio H.



Fonte: Autor (2017).

A embalagem que veio com o conjunto é confeccionada em polímero e apresenta pouco cuidado, com muitas rebarbas e não acondicionava bem o produto em seu interior. A Figura 22 apresenta o conjunto de embalagem e produto em seu interior.

Figura 22 - Acondicionamento do disco H.



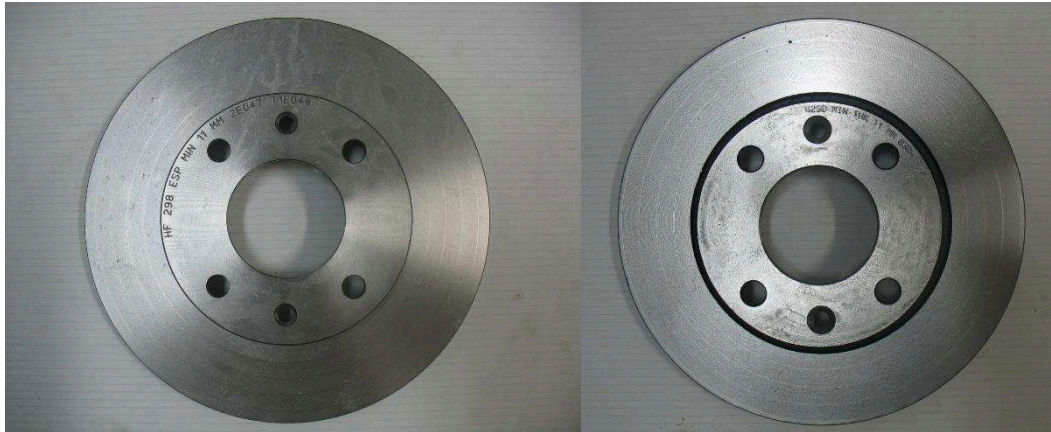
Fonte: Autor (2017).

Na imagem acima fica bem explícito o espaço existente entre o par de discos e a parede da embalagem, permitindo o deslocamento de ambas as unidades, podendo gerar defeitos. Ademais, há uma etiqueta com informações sobre o produto e fabricante, enquanto a superfície externa apresenta-se lisa e um pouco mole, torcendo-se facilmente, dificultando o manejo do conjunto discos mais embalagem.

O segundo par analisado apresenta o dobro do valor no mercado e é facilmente encontrado no comércio e está denominado como disco F. Apresenta coloração em dupla tonalidade, indicando que as regiões de coloração mais escura não sofreram processo de usinagem, dado que se apresenta muito mais rugosa em relação ao restante das superfícies. Um detalhe importante de ressaltar é que apresenta um rebaixo entre a pista de atrito e a região central do disco, como demonstra a Figura 23, o qual é inexistente no disco anterior, demonstrando que uma das etapas da usinagem foi eliminada, baixando o custo final do produto. Tem-se do lado esquerdo o disco H sem o detalhe e na direita o disco F, cuja região escura ilustra o entalhe na peça.



Figura 23 - Comparação discos com e sem entalhe.



Fonte: Autor (2017).

Ao toque apresenta-se suave, porém, é possível sentir pequenas ondulações muito possivelmente deixadas pelo processo de usinagem. Também apresenta marcas circulares na seção de atrito e traz impresso informações de lote, modelo da peça e espessura mínima de trabalho.

Sua embalagem destaca-se esteticamente dos outros produtos adquiridos, inclusive tem patente requerida de design. Apresenta uma estrutura esteticamente agradável e consegue acondicionar perfeitamente os discos em seu interior, sendo possível observar na Figura 24.

Figura 24 - Acondicionamento do disco F.



Fonte: Autor (2017).

Nota-se que a aparência externa é muito similar àquela apresentada pelo disco H, porém a mesma conta com grafismo externo com ilustrações, informações do produto e algumas características. A tampa superior contém orifício que permite a passagem de ar que facilita o fechamento da embalagem e também apresenta regiões com alto relevo, captando a atenção do consumidor pelo capricho do fabricante quanto a apresentação do produto.



O disco original, denominado PO, foi adquirido em concessionária autorizada apresenta coloração esbranquiçada, como representado na Figura 25 e é agradável ao toque, esta coloração possivelmente é oriunda de revestimento superficial de proteção.

Figura 25 - Disco de freio PO.



Fonte: Autor (2017).

Seu acondicionamento é feito com embalagem de papelão, onde um disco entra em contato direto com o outro. A seguir são apresentadas duas fotos do produto em sua embalagem original, a Figura 26, representa a esquerda o produto no interior da embalagem mostrando seu acondicionamento e a direita temos o produto com o lado externo de sua embalagem fechada. Assim como o produto F, este também conta com rebaixamento da pista de atrito entre o centro e a própria pista, como demonstrado na Figura 25.

Figura 26 - Ilustração do acondicionamento do disco PO.



Fonte: Autor (2017).

A embalagem apresenta etiquetas que identificam e trazem algumas informações sobre o produto, não há identificação ou qualquer marcação na estrutura do papelão.

Abaixo, na Figura 27, vemos uma comparação entre os elementos descritos acima, reforçando as diferenças entre cada disco e suas respectivas embalagens. Da esquerda para a direita temos o disco F, seguido do disco H e no lado direito da foto o disco PO.

Figura 27 - Discos novos lado a lado.



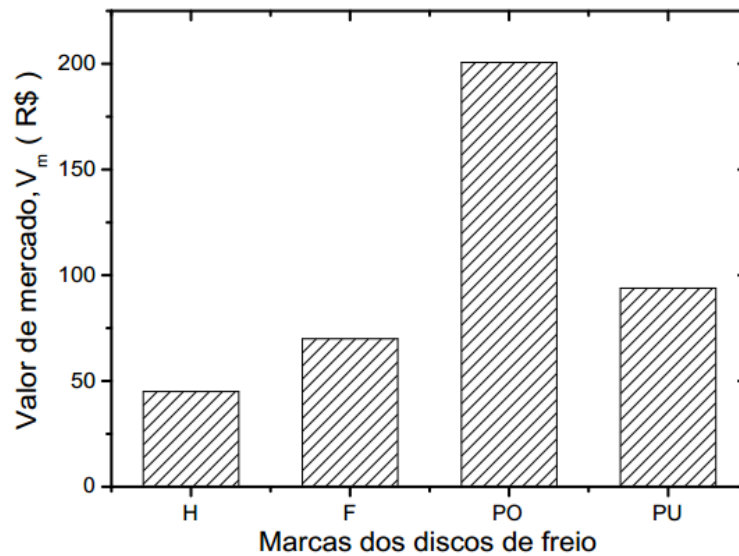
Fonte: Autor (2017).

Por último, mas não menos importante temos o disco usado (PU). O item mostra sinais de oxidação e marcas circulares na região de contato com a pastilha e coloração com formas complexas na faixa onde está localizada a furação de fixação da roda, como ilustrado na Figura 11.

Não apresenta embalagem própria, ficando exposto diretamente as intempéries externas. Também não estão presentes trincas que possam ser visualizadas a olho nu e não apresenta sinais de problemas provenientes de superaquecimento.

É possível visualizar na Figura 28 que os itens adquiridos apresentam custos com bastante distinção entre si, com foco no custo do modelo original, onde o custo de apenas um dos lados quase se equipara a soma dos pares dos outros discos novos.

Figura 28 - Valor de mercado dos objetos de estudo.



Fonte: Autor (2017).

O cálculo do valor de mercado para o modelo PU foi determinado pela depreciação do veículo, considerando um veículo ano 2009. É apresentada essa hipótese considerando a tabela de valores médios da Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (Fipe), que um veículo pode nesse período de tempo não percorrer a distância necessária para efetuar a troca dos discos de freio e que os componentes apresentam uma parcela de seu valor total, assim tomamos como verdade que o valor das partes será o seu custo quando novo menos a depreciação equivalente do veículo.

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS DISCOS DE FREIO SÓLIDOS

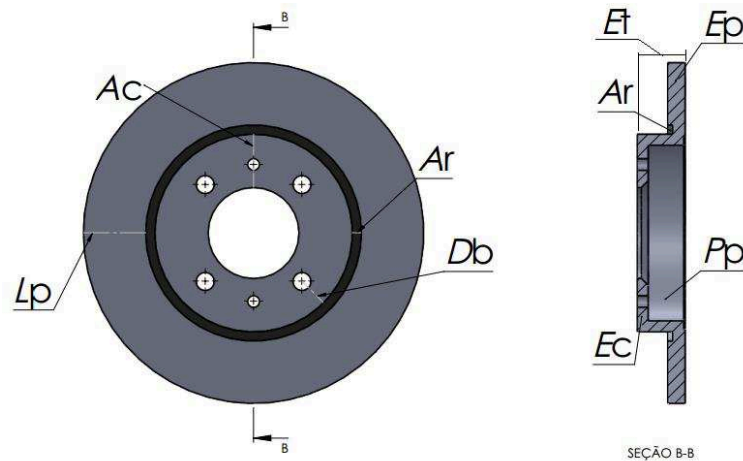
Ao total foram realizados, em laboratório, quatro experimentos e um processo de medição. Ainda como parte do processo deste trabalho, tivemos a busca por fornecedores e valores de mercado do objeto de estudo. De um total de 252 medições, 200 destes foram dados geométricos obtidos no laboratório da UFSC. As 52 medidas restantes (12 ensaios de tração, 4 de combustão, 4 de metalografia e 32 de dureza) foram realizadas nos laboratórios de empresa externa. Cada processo será abordado e serão apresentados os resultados obtidos.

#### 4.2.1 Análise geométrica e de massa dos discos de freio sólidos

Nesta seção serão apresentados quais as características geométricas, bem como sua caracterização representada através de modelo em CAD. São ilustradas duas imagens que representam e discriminam cada item. Também, temos expostos gráficos referentes as medições de cada parâmetro geométrico e também de sua massa. Ainda, são apresentados gráficos contendo a média das medições realizadas com os instrumentos de medição para cada disco, referente a cada grandeza geométrica anteriormente definida. Em cada um dos gráficos é apresentado o valor médio juntamente com a faixa de valores máximos e mínimos.

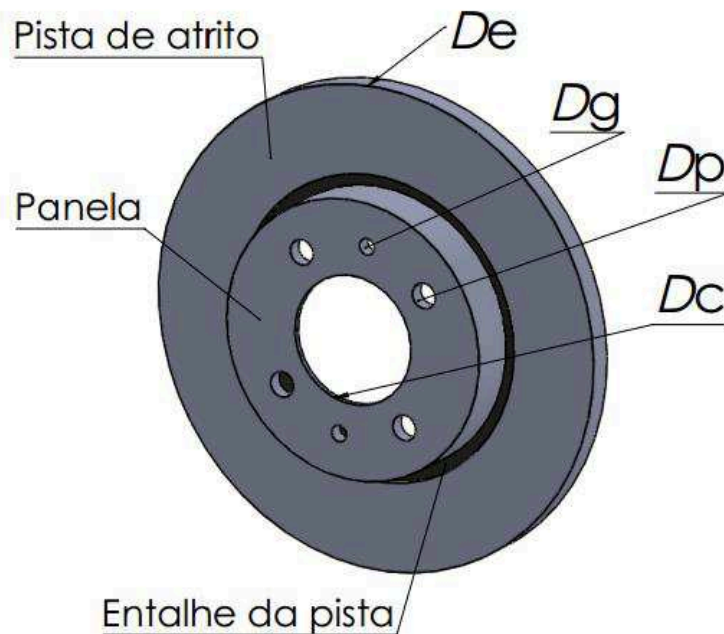
Com o disco em mão buscou-se discriminar cada parâmetro geométrico em que fosse possível realizar sua medição, captando ao máximo locais que pudessem apresentar variações. As Figura 29 e Figura 30 ilustram de maneira esquemática uma representação em programa CAD quais as regiões que foram submetidas ao processo de medição. O disco H por não apresentar o entalhe entre a pista de atrito e a região central da peça, naturalmente não terá este dado, o qual está representado pela sigla Ar.

Figura 29 - Ilustração das regiões medidas.



Fonte: Autor (2017).

Figura 30 - Ilustração das regiões medidas.



Fonte: Autor (2017).

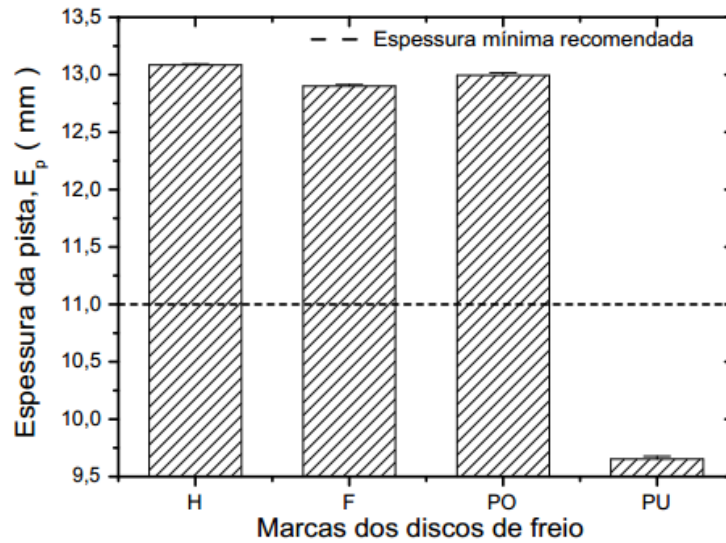
As partes indicadas acima foram denominadas como:

$E_p$  – Espessura da pista de frenagem,  $E_c$  – Espessura círculo central,  $E_t$  – Espessura total,  $D_p$  – Diâmetro do furo dos parafusos de fixação da roda,  $D_g$  – Diâmetro do furo guia,  $D_c$  – Diâmetro do furo do cubo de roda,  $A_c$  – Largura da panela do disco,  $L_p$  – Largura da pista de atrito,  $A_r$  – Altura do entalhe entre a pista de atrito e a região da panela,  $D_b$  – Distância dos furos de roda até a borda da panela e  $P_p$  – Profundidade da panela.

Algumas zonas despertam maior interesse de estudo, pois são partes que influenciam diretamente no desempenho da frenagem e na durabilidade do componente, tais como as regiões representadas pelos símbolos  $E_p$ ,  $L_p$ . Não menos importantes, os outros parâmetros também devem ser levados em consideração, visto que em caso de dimensionamento fora do padrão, a peça pode não ser posicionada corretamente, gerando vibrações, ruídos, contatos indesejados e prejudicando o sistema.

A Figura 31 demonstra os resultados médios das espessuras de pista medidas com paquímetro.

Figura 31 - Gráfico da espessura da pista.



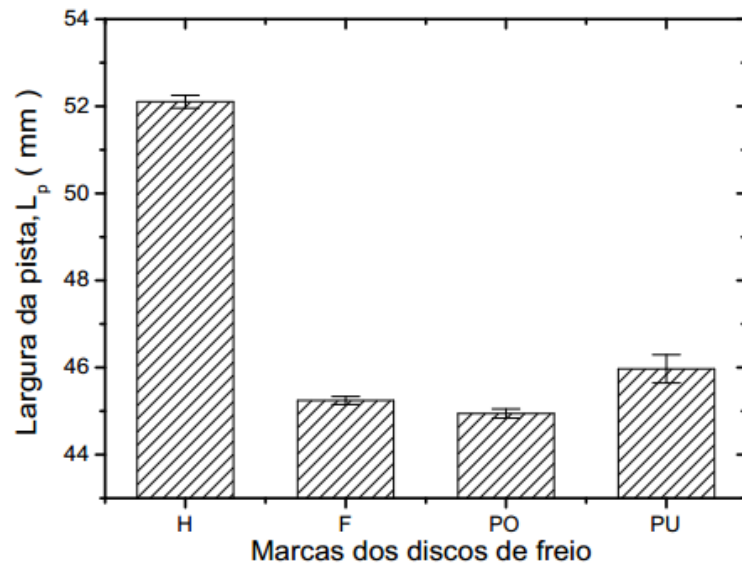
Fonte: Autor (2017).

Observa-se no gráfico acima que todos apresentam pequena variação, tanto entre discos do mesmo par quanto entre as diferentes marcas. De fato, chama a atenção o baixo valor exibido pelo modelo usado, inclusive abaixo do valor mínimo recomendando, algo esperado dada a quilometragem do veículo e que o elemento sofre desgaste com a frenagem. Também é válida a percepção de que o elemento H ultrapassa ligeiramente o valor dos outros modelos.

Outro fator considerado importante, a largura de pista que está representado na Figura 32, demonstra que a área de contato com a pastilha é bastante similar. A disparidade do modelo H pode ser justificada pela ausência do entalhe, que está presente nos demais. Observa-se que os modelos novos apresentam pequena variação nos discos do par e o modelo usado apresenta maior variação.



Figura 32 - Largura pista.

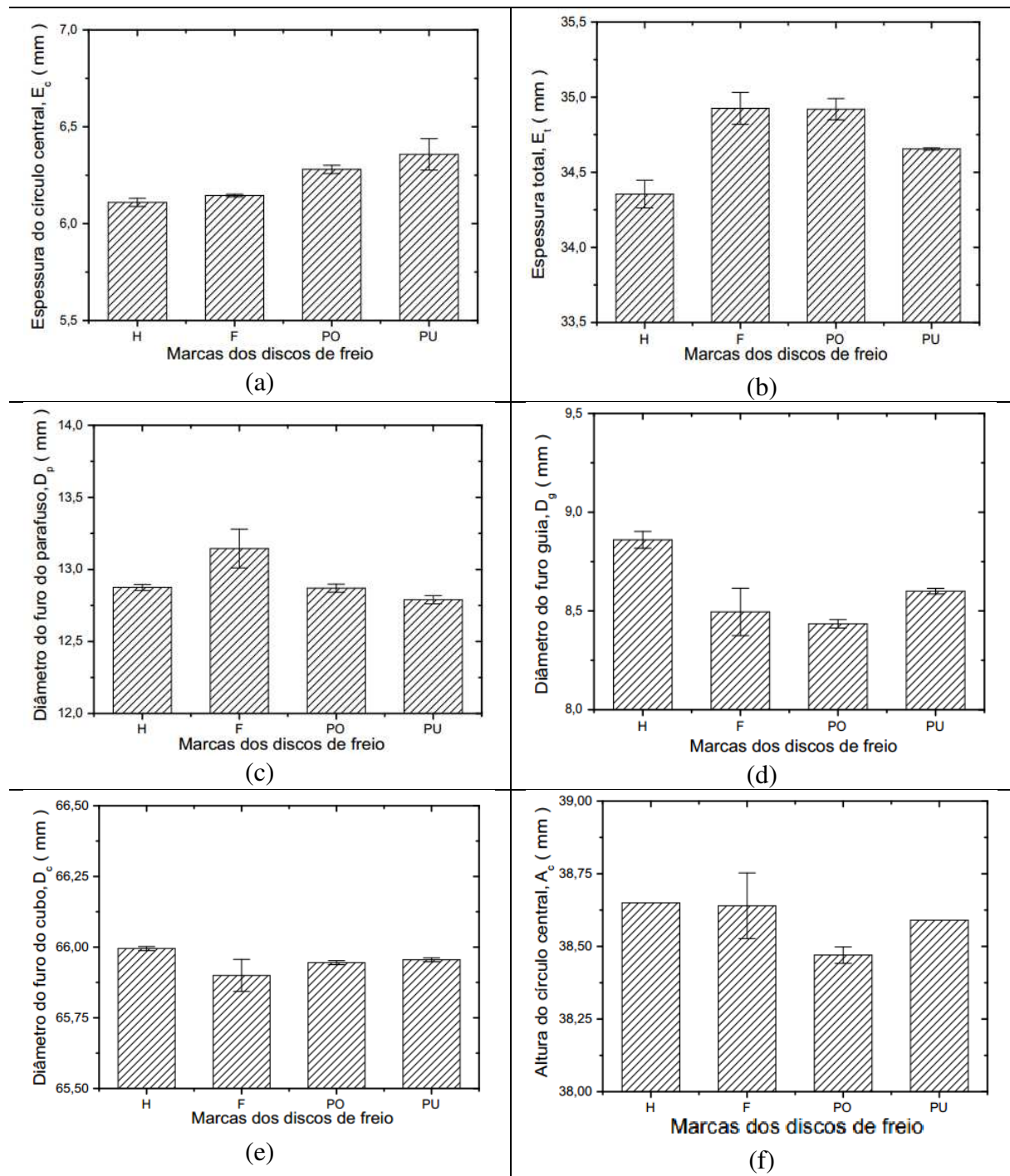


Fonte: Autor (2017).

A seguir temos as Tabela 4 e 5, que trazem os demais resultados das medições geométricas. Nelas, estão representados na seguinte ordem os itens: (a) Espessura do círculo central, (b) Espessura total, (c) Diâmetro do furo do parafuso de roda, (d) Diâmetro do furo guia, (e) Diâmetro do furo do cubo de roda, (f) Altura do círculo central, (g) Altura do entalhe, (h) Distância do furo a borda, (i) Profundidade da panela e (j) Massa.

Através dos itens (a) e (b), consta-se que as espessuras dos círculos centrais apresentam faixa de valores máximos e mínimos pequena em relação ao disco PU, porém o intervalo da espessura total no disco PU é menor que nos demais discos. Nos itens (c), (d) e (e) tem-se o disco F em destaque por apresentar grande variação entre medidas de diâmetro. Analisando o item (f), verifica-se a grande variação da altura do círculo central, que está inversamente relacionado ao diâmetro do furo do cubo. No item (g) percebe-se variação semelhante, sendo um pouco mais acentuada no disco PU, já no item (h) também apresentam semelhança, mas neste caso o disco F apresenta a menor entre elas. Ainda, no item (i) o disco H apresenta o menor valor, porém a maior variação.

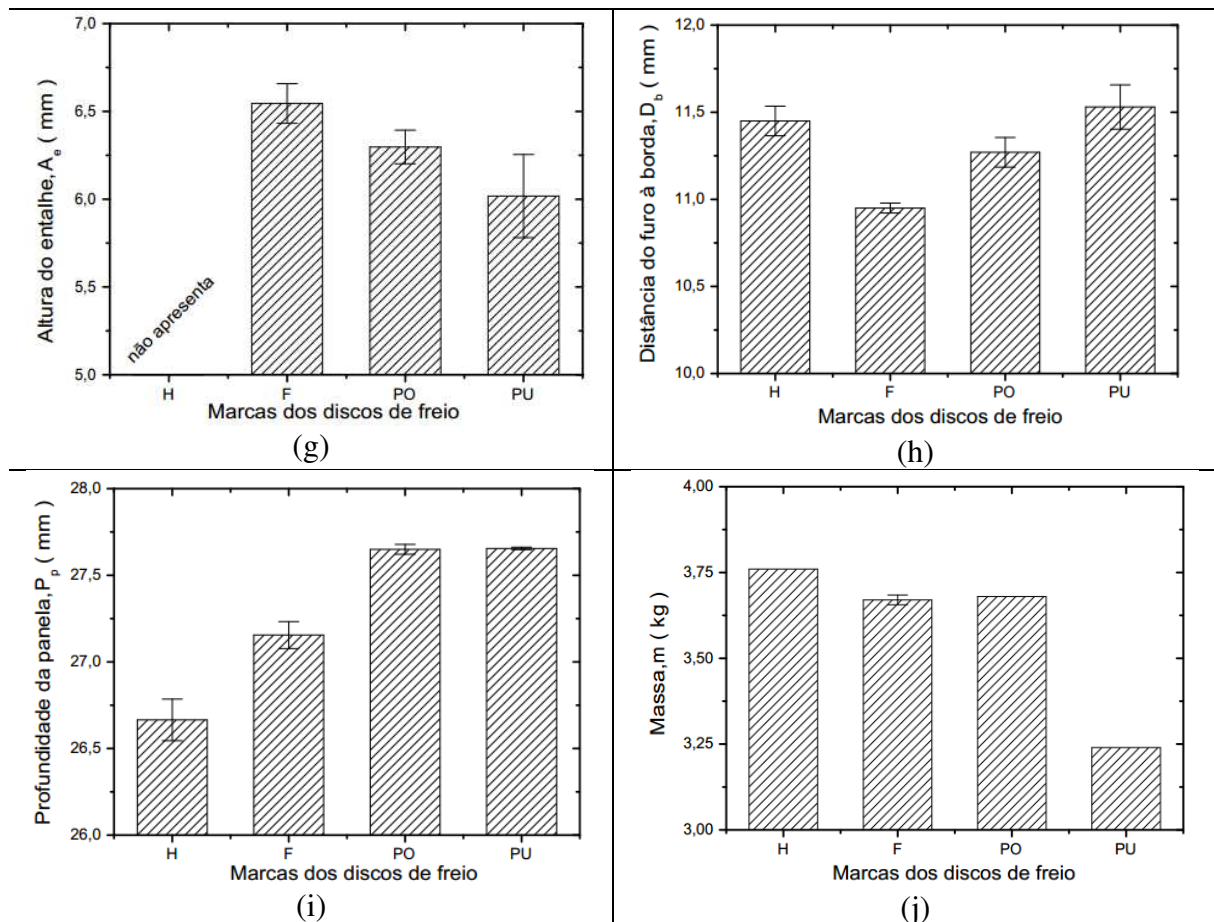
Tabela 4 - Resultado das medições geométricas.



Fonte: Autor (2017).



Tabela 5 – Resultados das medições geométricas.



Fonte: Autor (2017).

Por fim o único elemento que apresentou variação de massa no par foi o disco F, esta diferença está representada pela barra de erro na coluna do elemento F, como ilustrado no item (j). O modelo usado, assim como no caso da espessura de pista, apresenta massa bastante reduzida, sendo inevitável a redução de massa com o processo de frenagem, para este modelo de sistema.

#### 4.2.2 Composição química

As Tabela 6 e Tabela 7 trazem os resultados da composição química dos discos analisados. Cada disco foi analisado com uma única amostra para cada ensaio. Na Tabela 6, temos os resultados provenientes do teste do percentual de carbono (C) via combustão.

Tabela 6 - Tabela de resultados da análise por combustão.

<b>ANÁLISE DE CARBONO VIA COMBUSTÃO</b>	
Amostra	Percentual da massa (%)
H	C = 3,44
F	C = 3,37
PO	C = 3,25
PU	C = 3,37

Fonte: Autor (2017).

Nota-se que o modelo original apresenta a menor quantidade de carbono em sua composição. A Tabela 7 também apresenta dados referentes a porção mássica do carbono nos discos de freio, porém analisada através da espectrometria de emissão óptica. Também apresenta o resultado para os demais elementos, como: Silício (Si), Manganês (Mn), Enxofre (S), Fósforo (P), Cromo (Cr), Titânio (Ti), Estanho (Sn), Cobre (Cu), Níquel (Ni), Ferro (Fe) e outros.

Verificando o resultado de carbono para ambos os testes, percebe-se que seus resultados se assemelham bastante, onde o elemento que apresenta menor quantidade de carbono em um teste, apresenta no teste seguinte, valendo o mesmo para os demais discos, mas apresenta uma pequena variação entre os experimentos.

Tabela 7 - Tabela de resultados por espectrometria de emissão óptica.

<b>ANÁLISE POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA</b>				
Elemento \ Amostra	Percentual da massa (%)			
	H	F	PO	PU
C*	3,53*	3,5*	3,22*	3,43*
Si	2,11	2	1,95	1,93
Mn	0,56	0,6	0,5	0,49
S	0,113	0,05	0,092	0,07
P	0,035	0,085	0,028	0,026
Cr	0,113	0,173	0,116	0,125
Ti	0,014	0,02	0,01	0,008
Sn	0,025	0,049	0,021	0,049
Cu	0,169	0,081	0,168	0,504
Ni	0,05	0,018	0,038	0,044
Fe	93,19	93,41	93,81	93,3
Outros	0,091	0,014	0,047	0,024
Total	100	100	100	100

Fonte: Autor (2017).

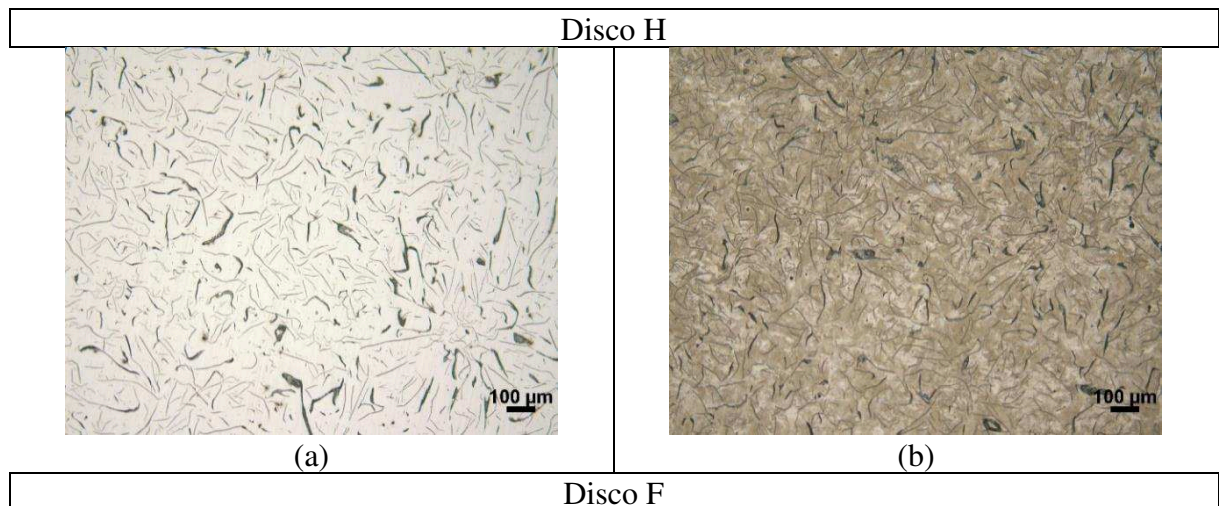
Infere-se da Tabela 6 que o cp com maior concentração de carbono é o da amostra H, assim como demonstra a Tabela 7. Também se observa na Tabela 7 que os outros elementos além de Carbono, Silício e Ferro, apresentam um percentual de massa muito pequeno. Apesar dos resultados para o carbono apresentarem consistência entre as duas medições, os resultados obtidos pelo método OES para o elemento carbono, não são confiáveis como o teste via combustão, dadas as características do processo de medição, justificando assim o uso de dois métodos de ensaio para o elemento carbono.

Os demais elementos são classificados como elementos de liga, conferindo propriedades específicas ao produto final. Por fim, os elementos classificados como outros apresentaram valores muito menores em comparação aos demais e foram agrupados.

#### 4.2.3 Metalografia

Com os ensaios, pode-se observar através das Tabela 8 e 9, nos itens (a), (c), (e) e (g), a morfologia da grafita presente no material antes do ataque químico, o qual apresenta-se na coloração negra. Nota-se que em todos os itens, a forma da grafita tem aparência de lamelas, com estrutura comprida e fina, enquadrando-se como forma lamelar, segundo a norma VDG-P441.

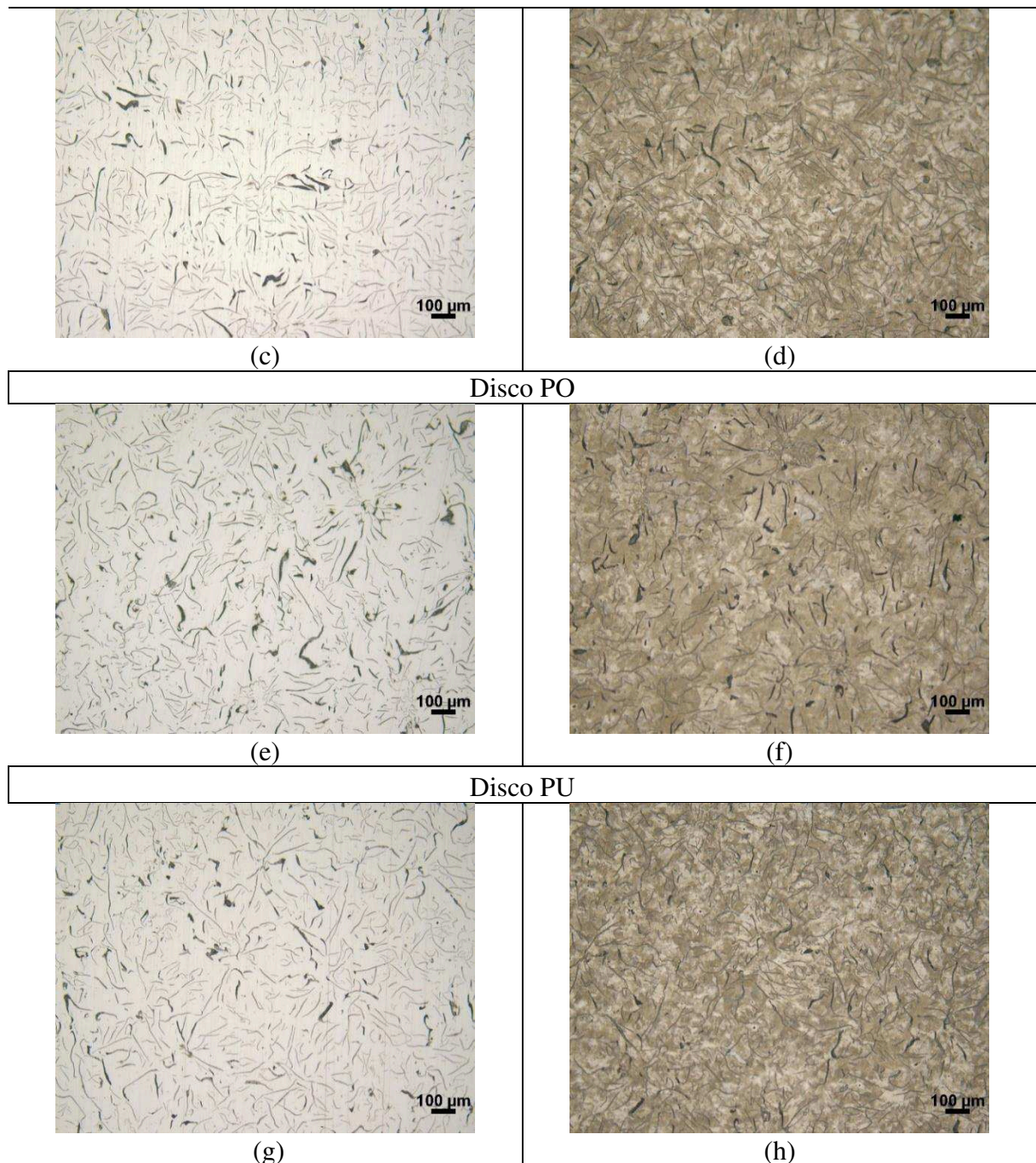
Tabela 8 - Resultados das análises metalográficas dos discos de freio.



Fonte: Autor (2017).



Tabela 9 - Resultados das análises metalográficas dos discos de freio.



Fonte: Autor (2017).

Posteriormente as amostras passaram pelo processo de ataque químico e são ilustradas nos demais itens da Tabela 8, de maneira que representam a matriz constituinte do material, sendo identificada como 100% perlítica.

Na Tabela 10 está representado um resumo da classificação das amostras de acordo com a norma VDG P441.

Tabela 10 - Classificação das amostras.

AVALIAÇÃO	CARACTERÍSTICA	AMOSTRA			
		1 (H)	2 (F)	3 (PO)	4 (PU)
MATRIZ	PERLITA (%)	100	100	100	100
GRAFITA	FORMA DA GRAFITA	I	I	I	I
	TIPO DA GRAFITA	A (B-D)	A (B-D)	A (B-D-E)	A (B-D)
	TAMANHO DA GRAFITA	4-5	4-5	4-5	4-5
	ÁREA	9,1	8,9	8,7	8,2
	GRAFITAS/mm <sup>2</sup>	380	388	360	289

Fonte: Autor (2017).

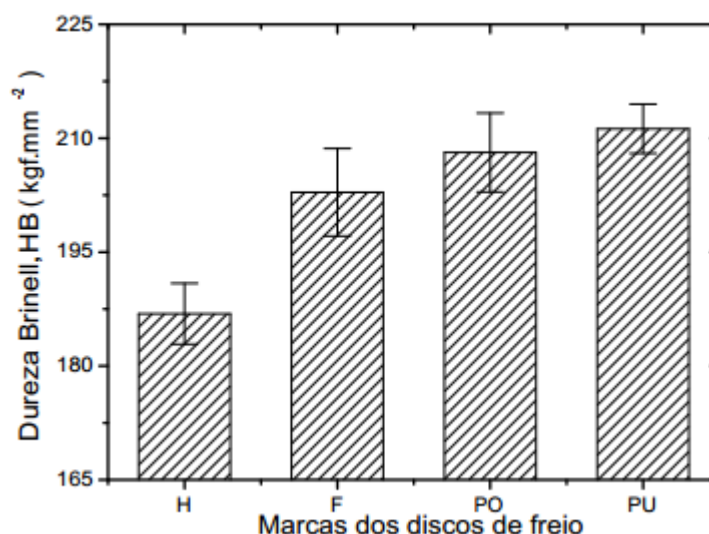
O tipo da grafita é classificado primordialmente como tipo A para todas as amostras, mas também apresentam pontualmente outros tipos, com destaque para o tipo de grafita da amostra PO, que apresenta além das formas B e D, também uma grafita na forma E, entretanto, o elemento PU não apresenta. A norma VDG Merkblatt P441 indica que tamanhos de grafita 4 e 5 possuem dimensões reais variando entre 0,06mm a 0,12mm.

O parâmetro área, indica o percentual de área do material que é preenchido pela grafita e pode explicar a resistência mecânica do material, onde pode-se observar que a grafita possui pontas em suas extremidades, trabalhando como um concentrador de tensão na peça.

#### 4.2.4 Dureza Brinell

O ensaio de dureza executado forneceu valores suficientes para montar o gráfico representado pela Figura 33. O valor encontrado para a média das amostras PU, PO e F são similares, apresentando valores de dureza média de, 211, 208 e 203HB respectivamente. O elemento H apontou um valor de 187HB. Para efeito de comparação, a dureza do elemento PU em relação ao PO teve um incremento 1,42%.

Figura 33 – Resultado do ensaio de dureza Brinell.



Fonte: Autor (2017).

O endurecimento por parte do elemento PU pode ser caracterizado através do encruamento do material devido ao uso. Meyers (1982), afirma que sólidos com estrutura cristalina sofrem deformações plásticas, devido a aplicação de forças. Com a aplicação dos esforços, o material torna-se mais resistente e uma tensão maior é necessária para ocasionar deformações adicionais, sendo este processo chamado de encruamento.

O aumento na dureza, de acordo com Meyers (1982), ocorre pela movimentação das discordâncias do material, de maneira que ocorre uma redução na mobilidade média destas, sendo também necessária a aplicação de uma tensão maior para ocorrência destes movimentos, isto é, deformar plasticamente o material, podendo justificar a maior dureza do elemento PU.

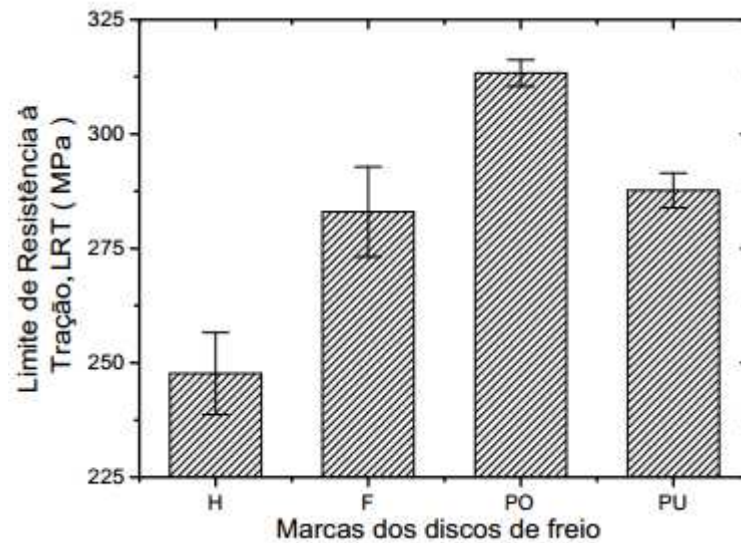
Nota-se na Figura 33 acima que o disco PU apresenta desvio padrão ligeiramente menor que dos outros itens medidos, entretanto pode-se considerar que os valores de dureza dos discos F, PO e PU não apresentam diferença entre si, pois seus desvios padrão se mesclam. Ainda, os três modelos semelhantes, situam-se na faixa de valores de dureza comumente obtida pelo laboratório para este tipo de componente e ensaio, enquanto o modelo H apresenta-se pouco abaixo do valor mínimo da média teórica.

#### 4.2.5 Tração

No quesito tração constata-se pela Figura 34 que a amostra PO apresentou valor de resistência mecânica um pouco superior ao limite da classe FC-200, apontando um valor de

313MPa enquanto as amostras H, F e PU apresentam respectivamente 248, 283 e 288MPa, podendo ser enquadrado em uma classe superior aos demais. Em comparação com a amostra de menor resistência essa diferença pode chegar a 32,2% se considerarmos o maior valor de PO com o menor valor de H. Comparando-se as amostras PO e PU tem-se uma redução da resistência de 8,7%.

Figura 34 – Resultado do ensaio de tração.



Fonte: Autor (2017).

As amostras H, F e PU estão na faixa definida para a classe FC-200 e FC250 para o exemplar PO. O disco PU apresenta resistência superior ao disco H, mesmo depois de passar por inúmeras frenagens e pelo processo de desgaste com consequente redução de material, já em relação ao disco F não é possível afirmar que tenham diferença. Em relação ao disco PO, o mesmo ficou menos rígido. Também vale ressaltar a grande variação representada na Figura 34 por parte das amostras H e F em relação as outras amostras e considerando que em um mesmo par essa variação pode ocorrer, a eficiência na frenagem pode ser prejudicada.

## 5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES

Nesta seção são apresentadas conclusões deste trabalho. Neste trabalho foram abordados tópicos relacionados a estudos das possíveis diferenças nos materiais de discos de freio. São sugeridos ainda alguns trabalhos que podem dar continuidade e complementar este trabalho.

### 5.1 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi o de avaliar diferenças nas propriedades dos discos de freio. Após a realização dos ensaios conclui-se que os métodos de ensaio mostraram-se adequados para tal análise, resultando em valores condizentes com dados bibliográficos. Por meio do ensaio de metalografia, foi constatado que as amostras apresentaram microestrutura similar e matriz idêntica; onde de acordo com dados da literatura, pode-se dizer que as amostras entram na categoria do ferro fundido cinzento, os quais apresentam como principais elementos, além do ferro, o silício e o carbono, onde foi constatado que apresenta microestrutura lamelar com matriz perlítica e a grafita apresenta-se de tamanho intermediário. Também pode-se dizer que com o experimento da dureza o disco de freio torna-se mais duro com o uso.

Em relação as propriedades mecânicas, estas mostraram-se bastante dependentes do percentual de carbono e da forma apresentada pela grafita presente no material. A resistência a tração e a dureza são menores quanto maior o percentual de massa de carbono, onde valores menores de dureza são justificados pela maior área da grafita, de maneira que quando ocorre a indentação, esta abrange regiões com maior quantidade de grafita, que comparada aos outros materiais metálicos é extremamente frágil e macia, ocorrendo assim maior penetração da ponta de teste no material durante o ensaio. Já quanto a resistência a tração, esta também é proporcional a área da grafita, sendo consequência da maior quantidade de carbono e da maior fração volumétrica da grafita, aumentando assim as regiões de concentração de tensão, ocasionando mais facilmente a propagação de trincas.

Discos que apresentam menor resistência a tração, possivelmente tem menor capacidade de absorção de grandes forças aplicadas ao sistema, como o caso de uma frenagem de emergência, tornando necessária uma maior distância de parada, considerando apenas aspectos entre pastilhas e disco. Assim a maior dureza apresentada, em contrapartida, o custo elevado do disco fornecido pela concessionária pode ser justificado, dado que em uma frenagem



de emergência, são imprimidos momentaneamente maiores esforços no sistema, podendo levar a insuficiência do sistema caso o disco não suporte tais esforços.

Constata-se que os discos de menor custo são os que demonstraram propriedades mecânicas inferiores em comparação aos demais, conseqüentemente seu desempenho de frenagem tende a ser inferior, porém não foi quantificada essa diferença. Ainda, em relação ao custo, o alto valor apresentado pelo disco PO, em comparação aos outros, pode ser justificado, pois o mesmo apresenta as melhores propriedades mecânicas. Entretanto, as diferenças nas composições não são suficientemente grandes para apresentar um valor significativo na aquisição da matéria prima.

Entre discos novos, as medidas geométricas que estão em contato com a pastilha de freio apresentam menores variações quando comparadas as demais medidas geométricas que compõem o disco, levando a crer maior atenção a essas regiões por parte dos fabricantes. Por fim, mesmo com espessura inferior a recomendada, o disco usado apresenta propriedades similares aos discos do mercado de reposição, exceto o disco de concessionária, indicando que se apenas os fatores aqui estudados atuassem no sistema de freio, sua espessura mínima poderia ser revista. Estas análises tornaram evidentes as diferenças nos produtos, em termos de propriedades mecânicas e composição química, indicando que existe diferença de desempenho em relação a produtos de maior valor de mercado e não apenas o caráter de ser um produto original ou do mercado paralelo.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como continuação deste trabalho e complementando as informações já coletadas, pode-se em um trabalho futuro realizar os processos de medição geométrica com instrumentos de maior precisão e melhor controle, também, utilizar mais amostras de discos de freio usados, com distintas distâncias percorridas, como por exemplo, 20mil, 40mil, 60 mil quilômetros.

Além disso, estudo realizando diversos ensaios como fadiga térmica, tempo, potência, dissipação de calor e ruído de frenagem de acordo com o fabricante, utilizando dinamômetro de bancada, assim como o estudo de tribologia e desgaste dos discos. Por fim um estudo com diferentes combinações de pastilhas de freio com discos de diferentes fabricantes, de maneira a identificar o comportamento do desempenho entre as amostras.

## REFERÊNCIAS

- AECLASSIC. **Fading, o inimigo do motorista**. 2014. Disponível em: <http://www.autoentusiastasclassic.com.br/2011/06/fading-o-inimigo-do-motorista.html>. Acesso em: 24 nov. 2016.
- ANDERSON, A. E. **HOT SPOTTING IN AUTOMOTIVE FRICTION SYSTEMS**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WEAR OF MATERIALS, 135., 1989, Denver. Wear. Denver: Elsevier, 1990. p. 319 - 337.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10966-1**: Veículos rodoviários automotores — Sistema de freio. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 32 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6891-1**: Materiais metálicos — Ensaio de Tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 70 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892-1**: Materiais metálicos — Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio a temperatura ambiente.
- AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. **ASTM A370:2017**: Standard tests methods and definitios for mechanical testing of steel products.
- BAUER, H. **Conventional and electronic braking systems**. Plochingen: Robert Bosch GmbH, 2003. 134 p.
- ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. São Paulo: Mcgraw-hill, 2006. 394 p.
- COPALERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 652 p.
- CHO, M.H et al. **Tribological study of gray cast iron with automotive brake linings: The effect of rotor microstructure**, Seoul, p.57-66, 1 nov. 2002. Anual.
- Cueva, E. G. et al. **Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors**. Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear, São Paulo, v. 255, n. 7, p.1256-1260, set. 2003. Mensal.
- ONLINE, Tabela Fipe. **Preço Médio de Veículos**. Disponível em: <http://www.tabelafipe.commbbr.org/26102017/fipe/26102017/fipe-94915/home-453324822.asp?id=284819082>. Acesso em: 26 out. 2017.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: Ltc, 2000. 247 p.
- GENTA, G; MORELLO, L. **The Automotive Chassis**. Dordrecht: Ed. Springer, 2009.
- GRADELA, F. B. **Identificação das falhas utilizando FMEA no Sistema de freios de carro de competição on-road – Fórmula-SAE**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

GUESSER, Wilson Luiz et al. **Ferros Fundidos Empregados para Discos e Tambores de Freio**. In: BRAKE COLLOQUIUM, 1., 2003, Gramado. Papers. Gramado: Sae Brazil, 2003. v. 1, p. 1 - 5.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**. Rio de Janeiro: Ltc, 2008.

Hecht, R.L., Dinwiddie, R.B. & Wang, H. **The effect of graphite flake morphology on the thermal diffusivity of gray cast irons used for automotive brake discs**. Journal of Materials Science (1999) 34: 4775.

HEISLER, Heinz. **Advanced vehicle technology**. Warrendale: Butterworth-Heinemann, 2002. 656 p.

JOCAR. **Disco de freio: alternativo**. 2016. Disponível em: <<https://www.jocar.com.br/Produto.aspx?CP=713778>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

KAWAGUCHI, Hiroaki. **Comparação da análise de conforto de frenagem subjetiva x objetiva de um veículo de passeio**. 2005. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Automotiva, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LEAL, L. D; ROSA, E; NICOLAZZI, L. C. **Uma Introdução à modelagem quase estática de automóveis**. Apostila, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Publicação Interna do GRANTE, Florianópolis, 2012.

LIMPERT, R. **Brake Design e Safety**. Warrendale: Ed. SAE International, 1999.

MACKIN, Thomas J. Et al. **Thermal Cracking in disc brakes**. In: ENGINEERING FAILURE ANALYSIS 9, 2002, Urbana. Engineering Failure Analysis 9. Urbana: Pergamon, 2002. p. 63 - 76.

MACNAUGHTAN, M. Cast iron brake discs: **A brief history of their development and metallurgy**. Foundryman, Institute of British Foundrymen, Birmingham, p. 321-324, 1998.

MALUF, Omar et al. **Discos de freio automotivos: Aspectos históricos e tecnológicos**. 2007. Disponível em: <[http://repositorio.pgsskroton.com.br/bitstream/123456789/1301/1/Artigo 20.pdf](http://repositorio.pgsskroton.com.br/bitstream/123456789/1301/1/Artigo%20.pdf)>. Acesso em: 12 out. 2017.

MEYERS, Marc A.; CHAWLA, Krishan K. Encruamento. In: MEYERS, Marc A.; CHAWLA, Krishan K. **Princípios de metalurgia mecânica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1982. Cap. 9.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**. Porto Alegre: Bookman, 2004.

ORTHWEIN, W. C. **Clutches and brakes – Design and selection**. Nova York. Marcel Dekker, 2004.

ROSA, Felipe. **Ensaio de tração**. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/felipecrosa9/aula-6-propriedades-mecnicas>>. Acesso em: 09 nov. 2017.

RAO, Singiresu S. **Vibrações mecânicas**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SANTOS, Adalberto Bierrenbach de Souza; BRANCO, Carlos Haydt Castello. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. São Paulo: Ipt, 1989. 205 p.

SCLAR, Deanna. **Mecânica de automóveis**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2015.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de engenharia mecânica**. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960 p.

**VDG P441** Merkblatt, Düsseldorf, August 1962.